THE COSMIC FRONTIERS OF GENERAL RELATIVITY

William J. Kaufman, III

Astrophysics-Relativity Group
Department of Physics
San Diego State University
and Department of Astronomy
University of California,
Los Angeles

LITTLE, BROWN AND COMPANY
BOSTON, TORONTO

У. КАУФМАН

КОСМИЧЕСКИЕ РУБЕЖИ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Перевод с английского
д-ра физ.-мат. наук, профессора
Н. В. Мицкевича

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
МОСКВА 1981

22.313
К30
530.1

Кауфман У.

К30 Космические рубежи теории относительности: Пер. с англ.– М.: Мир, 1981. 352 с., ил.

Общедоступное изложение принципов общей теории относительности А. Эйнштейна и ее приложений к исследованию тех удивительных объектов Вселенной – черных дыр, гравитационных линз, нейтронных звезд и т.п.,– свойства которых можно понять только на основе релятивистских представлений.

Рассчитана на школьников старших классов, студентов младших курсов и всех, интересующихся достижениями современной науки.

К $\frac{20605\text{-}103}{041(01)\text{-}81}$ 103-81, ч. 1 1704020000

22.313

Редакция литературы по космическим исследованиям, астрономии и геофизике

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРЕВОДУ

Советские читатели за последние десятилетия получили много интересных и полезных книг, освещающих идеи и достижения физики, астрофизики и геометрии, имеющие прямое отношение к проблемам, рассматриваемым автором в предлагаемом популярном труде по общей теории относительности. Когда мы говорим о теории относительности, то, как правило, имеем в виду частную (или специальную) теорию относительности, созданную Альбертом Эйнштейном в 1905 г. Общая же теория относительности, разработанная Эйнштейном в 1911–1915 гг., пока остается для большинства тайной за семью печатями. Почему же специальная теория оказалась общим достоянием, а общая – достоянием узких специалистов? Первая является частным, самым простым случаем общей теории относительности и касается «лишь» произвольно больших скоростей. Иными словами, это такое обобщение физики Ньютона, к пониманию которого люди с обычным школьным образованием уже более или менее подготовлены (в нашей средней школе не только вводятся релятивистские, т.е. относящиеся к теории относительности, представления, но иногда даже ведутся расширенные факультативные занятия по этой теории). Однако общая теория относительности в ее полном объеме требует не только гораздо более мощного и сложного математического аппарата для ее серьезного изложения, но и опирается на идеи, непривычные и даже чуждые тем, которые рождены нашим повседневным опытом. Это неудивительно: наше восприятие мира, наша интуиция, весь наш строй мыслей определяются наличным бытием, образом жизни, который в данное время преобладает. А где вы встретите в повседневной жизни те экстремальные физические условия, в которых свет распространяется не по прямой, пространство (вместе со временем!) искривляется и эволюционирует, а черные дыры неумолимо «заглатывают» и «переваривают» все, что подойдет к ним слишком близко? Эти новые представления, к которым физика и астрофизика пришли за последние два десятилетия своего бурного развития, потому и являются новыми, что не сводятся ни к чему известному ранее и требуют коренной перестройки наших привычных убеждений. Речь идет не только об экзотических явлениях, протекающих где-то в недостижимых для нас областях космоса, но и о таких, которые при всей своей коренной необычности определяют судьбу мироздания, эволюцию Вселенной, развитие галактик и звезд (включая наше Солнце), источники энергии,

в миллиарды раз более эффективные, чем мы могли себе вообразить до создания теории относительности. Эта теория не только привлекает своей необычностью и великолепием абстрактных построений, но и проникает в самую сущность вещей и процессов, выявляет пути развития материального мира.

И здесь хотелось бы остановиться на другой стороне проблемы. Мы живем в эпоху научно-технической революции, когда, по словам К. Маркса, наука становится непосредственной производительной силой. Многое зависит от того, кто и когда придет в науки, занимающиеся исследованием ключевых проблем природы и общества, как эти проблемы будут анализироваться и какое приложение найдут полученные результаты. Жизнь спешит вперед, и задача подготовки кадров, воспитания нового поколения исследователей и практиков как никогда ранее является насущной задачей. Вступая в творческую жизнь, молодые люди далеко не всегда способны строго оценить, какой им лучше избрать путь, чтобы он был увлекательным и соответствовал их индивидуальным данным. В этом вопросе всегда будет играть определенную роль случайность, но помочь и облегчить оптимальный выбор может и должно широкое знакомство молодежи с «горячими точками» науки, техники и практики. Предлагаемая читателю популярная книга У. Кауфмана как раз и является примером такой экскурсии в новую, богатую и впечатлениями, и актуальнейшей проблематикой область. На наглядных и контрастных примерах (при всей внешней утрированности остающихся реальными!) автор сеет в уме читателя семена поиска, интереса к новому, трудному, но необходимому для дальнейшего развития наших знаний и умения «владеть» природой, увлекательнейшему разделу науки. Конечно, начало в этих исследованиях уже положено, первые результаты получены, и дальше необходим серьезный систематический труд, чтобы продвинуться вперед. Но так бывает всегда. И при этом не может быть сомнений, что усилия в этой области не будут напрасными. Пусть школьники и студенты младших курсов прочитают эту книгу и подумают, не следует ли им посвятить свою жизнь такой теории. Конечно, нужно именно посвятить всю жизнь, ибо такое дело не делается наполовину.

В этой книге рассказ ведется, как в заправском детективном романе. После завязки и характеристики «действующих лиц» накал событий нарастает, мы становимся свидетелями драматической эволюции звезд и сверхзвезд, сталкиваемся с явлением гравитационного коллапса, путешествуем на «космических кораблях» (иногда даже без двигателей!) в черные дыры, а сквозь некоторые из них – в новые вселенные, которых иногда оказывается бесчисленное количество... Правда, потом автор уточняет положение вещей, и мы видим, почему на самом деле этих ро-

мантических «других вселенных», по всей видимости, не должно быть, а заодно с ними – и «машин времени», о которых здесь тоже пойдет речь. Но одновременно мы столкнемся с не менее важными, хотя, может быть, и не столь сенсационными выводами о судьбе галактик и черных дыр. Конечно, в популярной книге, где нет формул (их место занимают многочисленные рисунки и диаграммы, которые хотя и не могут логически доказать утверждения, но делают их предельно наглядными и запоминающимися), невозможно охватить весь объем информации и не упростить ряд факторов и выводов. Но главная цель достигается – читатель окунается с головой в атмосферу общей теории относительности и может после этого сознательно делать выбор и приступать к изучению более строгих книг по физике, геометрии, астрофизике. Таких книг на разных уровнях у нас немало. Для начала можно рекомендовать «Физику пространства-времени» Э. Тейлора и Дж. Уилера (М.: Мир, 1971), доступную и школьнику старших классов.

В той области науки, которую описывает автор, развитие идет сейчас полным ходом. Немудрено, что ряд понятий еще не установился, термины сплошь и рядом только «обкатываются», и хотелось бы предупредить читателя, чтобы он диалектически приходил к самому тексту изложения. Мы стремились передать живой стиль книги в оригинале и быть близкими к стандартам, уже принятым в отечественной литературе. Правда, стандарты эти порой находятся в процессе становления, а иногда требуют улучшения. Так, в нашей литературе употребляются два эквивалентных, но разных по написанию термина: времениподобный и временноподобный (это обычно относится к вектору или отрезку). Первое было введено на русском языке в работах В. К. Фредерикса и др. (см. вышедшую недавно книгу: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля.– М.: Наука, 1973); второе также неоднократно использовалось разными авторами (например, Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения.– М.: Физматгиз, 1961). Поскольку в русском языке соединительными гласными могут быть только «а» и «е», мы выбираем термин «временноподобный», тем более что ему соответствует принятый всеми авторами термин «пространственноподобный» (а не «пространствуподобный»!). Фамилию крупнейшего английского специалиста по черным дырам Стивена У. Хоукинга мы предлагаем писать через «оу» (а не как «Хокинг», как пишут иногда, тем более что существует совсем другой физик, с полным основанием транскрибируемый у нас как Хокинг; в то же время выдающийся английский гравитационист Р. Пенроуз всегда удачно транскрибируется через «оу»).

Мы уже отмечали, что в книге Кауфмана общедоступно излагаются события «с переднего края» развития современной физи-

ки и астрофизики. Естественно, что за годы, прошедшие после выхода в свет книги, в этой области произошли некоторые изменения, связанные и с новыми открытиями, и с новыми, более совершенными методами исследования.

Так, полным ходом идут поиски черных дыр, ведутся расчеты многочисленных эффектов, характерных именно для этих удивительных объектов. При этом изучаются возможности существования как «звездных» черных дыр (с массами в несколько масс Солнца), так и сверхмассивных черных дыр, по массам не уступающих ядрам галактик.

Замечательные результаты получены при наблюдениях пульсара, входящего в состав двойной системы. Этот пульсар, играющий для нас роль точнейшего стандарта частоты (т.е. естественных «часов»), обращается вокруг другой звезды (точнее, вокруг общего центра масс системы). (Не исключено, что второй компонент системы – черная дыра!) В подобной системе особенно легко выявить изменение орбитального периода обращения, причем оказалось, что такое изменение реально существует и в точности соответствует значению, предсказываемому общей теорией относительности на основании уноса энергии из системы за счет гравитационного излучения. По-видимому, тем самым впервые получено наблюдательное, хотя и косвенное, подтверждение реальности гравитационных волн.

Наконец, в 1979 г. в созвездии Большой Медведицы была обнаружена странная система из двух квазаров, необычайно похожих друг на друга. Их свойства, обычно совершенно различные для разных квазаров, на сей раз оказались практически тождественными, и все больше укрепляется уверенность в том, что на самом деле это один квазар, а его «удвоение» – результат действия космологической «гравитационной линзы» – тот самый эффект, о котором пишет Кауфман. Это ли не подтверждение того факта, что в книге речь действительно идет о событиях с «переднего края» науки!

Позволим же себе еще раз высказать надежду, что эта книга доставит удовольствие читателям, а быть может, направит некоторых на путь поиска, учебы и научных изысканий, соответствующих их задаткам и наклонностям, – путь, ведущий к новым замечательным открытиям.

Н.В. Мицкевич

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ли – с любовью и признательностью

Одной из примечательных особенностей астрономии последнего десятилетия является бурное возрождение интереса к общей теории относительности. Открытие пульсаров в 1967 г. побудило астрофизиков произвести детальные расчеты структуры нейтронных звезд; эти расчеты показали, что для звезд с массами, превышающими 1,5 массы Солнца, не существует устойчивых конфигураций. Воодушевленные как этим открытием, так и другими, столь же волнующими, теоретики-астрофизики с небывалым рвением занялись проблемой черных дыр. Плодом их усилий был целый ряд новых открытий.

Но эти поразительные открытия оказались доступны лишь профессионалам-астрономам и физикам, достаточно владеющим языком математики, чтобы читать специальную литературу. А к чему обратиться любознательному читателю или студенту, чтобы попытаться понять, что такое черная дыра или искривленное пространство-время и чем замечателен Лебедь-Х?

Эта книга написана, чтобы удовлетворить запросы именно таких людей. В ней отсутствует математический аппарат, и от читателя требуется лишь заинтересованность и пытливость ума. Чтобы читать ее, можно (или нужно) знать лишь элементы математики, ибо автор старался пользоваться языком, доступным неспециалисту. Для объяснения многих понятий общей теории относительности вместо сложных математических формул повсюду использовались графики и диаграммы. В книге более 200 иллюстраций, и в их числе – диаграммы вложения, диаграммы Пенроуза и виды из иллюминаторов воображаемых космических кораблей, влетающих в черные дыры и проваливающихся в «кротовые норы» пространства-времени.

Если читателю понравится этот новый подход, то, как надеется автор, его книгу окажется возможным использовать как дополнение к вводному курсу астрономии или как пособие по курсу, который обычно предлагается студентам гуманитарных специальностей, интересующихся более подробным изучением избранных разделов астрономии. Автор стремился сделать изложение живым и интересным как для тех, кто изучает астрономию, находясь в стенах аудитории, так и для тех, кто делает это самостоятельно.

В конце 1974 г. я ушел в длительный отпуск с поста директора Гриффитской обсерватории и возвратился в группу астрофизики и теории относительности при Калифорнийском технологи-

ческом институте. Я благодарен членам отделения физики, и в особенности Кипу С. Торну за чуткое отношение. В этой книге, прежде всего благодаря моему пребыванию в Калтехе, рассказывается об открытиях, которые еще не были опубликованы в специальных журналах. В этом отношении я глубоко признателен Ч. Т. Каннингэму и С. У. Хоукингу за многочисленные обсуждения и разъяснения, а также за знакомство с их расчетами до опубликования.

Я хочу поблагодарить Дж. О. Эбелла из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и Д. М. Эрдли из Йельского университета за обсуждение рукописи книги и за советы. Я благодарен также отделению астрономии Калифорнийского университета за приглашение прочитать в университете курс по избранным вопросам астрономии в конце 1975 г. и летом 1976 г.: это была возможность испробовать свои мысли и свой подход на студентах.

Большинство рисунков для этой книги было выполнено Джоем Волем, талант и терпение которого заслуживают самой высокой оценки. Наконец, я глубоко благодарен Луизе Нельсон за печатание рукописи.

У. Кауфман

1

ОРИЕНТИРОВАНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ

На протяжении многих тысячелетий люди пристально вглядывались в усыпанное звездами ночное небо, испытывая благоговейный трепет перед его величием и таинственностью. Еще в древнейшие времена, от которых не сохранилось никаких письменных свидетельств, людей повергал в изумление размеренный ход небесного механизма. Восход и заход Солнца, смена фаз серебристого диска Луны, драматическое зрелище солнечного затмения и странствия планет по созвездиям пояса Зодиака – всего этого было достаточно, чтобы побудить наших предков заняться астрономией.

Оглядываясь назад, следует признать, что глубокая проницательность и преданность точному знанию, проявленные многими древними цивилизациями, поистине удивительны. Архитекторы пирамид и строители Стоунхенджа несомненно располагали богатейшим запасом сведений из области астрономии, собрать которые можно было лишь благодаря неустанным и кропотливым наблюдениям, ведущимся десятилетиями, а то и на протяжении жизни нескольких поколений. По основательности этих наблюдений можно заключить, что древние гораздо больше интересовались астрономией, чем наши современники, живущие в век, именуемый космическим. В определенном смысле можно даже сказать, что строительство Стоунхенджа (рис. 1.1) 5 тысяч лет назад было намного более впечатляющим достижением человечества, чем космические полеты на Луну, осуществленные в 1970-х годах.

Это становится особенно очевидным, если принять во внимание размеры расходов на программу космических исследований и то, сколь мало она коснулась нашей повседневной жизни. В период наиболее интенсивного претворения в жизнь проекта «Аполлон» ежегодные затраты на него составляли столько же, сколько американцы ежегодно тратят на корм для собак, треть их расходов на сигареты и одну седьмую – на спиртные напитки! А теперь сравните это с тем, что тысячелетия назад крупные города, подобные обнаруженным в Центральной Америке, возво-

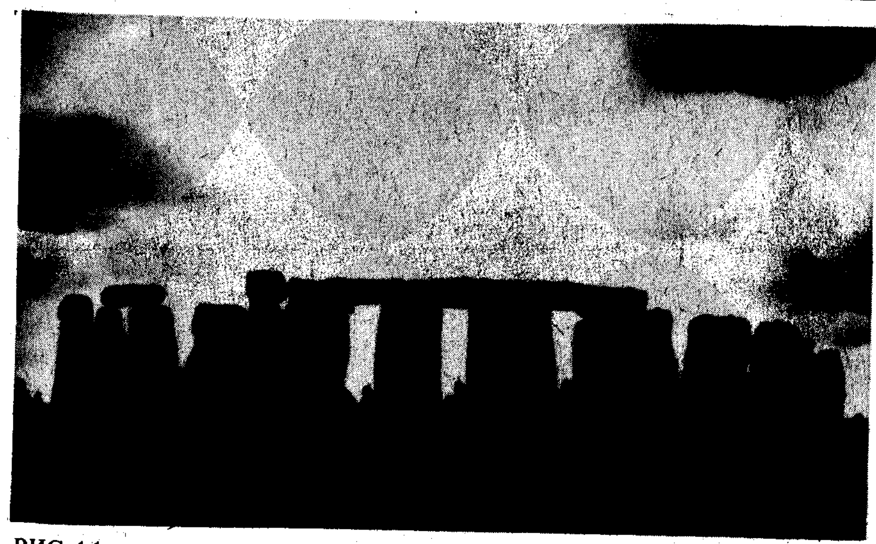


РИС. 1.1.

Стоунхендж. Этот астрономический памятник, созданный почти 5000 лет назад, высится как немое свидетельство изобретательности и мастерства человека в глубокой древности. (Снимок Гриффитской обсерватории.)

дились с учетом основных астрономических направлений. Если задуматься над феноменальными достижениями древних цивилизаций в области астрономии и над тем, как их астрономические познания проникали всюду – от возведения памятников и храмов до планировки городских улиц, то научная деятельность на обсерватории Маунт Паломар или на космической станции «Скайлэб» предстанет перед нами в несколько ином свете. Это говорит о том, что мы смотрим на космос совершенно иначе, чем наши предшественники.

Независимо от точки зрения или устремлений любое познание Вселенной должно начинаться с некоторых наблюдений. Правда, лишь немногие могут удовлетвориться одними нескончаемыми наблюдениями. Недостаточно просиживать ночь за ночью, ограничиваясь регистрацией положений звезд и планет или делая снимок за снимком. В один прекрасный момент каждый из нас задает себе вопрос: почему все в мире происходит именно так, а не иначе? В один прекрасный момент нам захочется узнать, почему и как движутся планеты или почему галактики обладают именно такими размерами и формами. На протяжении веков люди в той или иной мере осознавали, что во Вселенной

существует некоторый порядок. Регулярные восходы и заходы Солнца, совершающиеся из года в год, смена фаз Луны каждые четыре недели – все это внушало мысль о порядке, а не о хаосе. Именно это проявление упорядоченности вселяет в нас надежду на более глубокое понимание мироздания.

Совокупность идей или гипотез, выражающих понимание Вселенной как некоего целого и позволяющих объяснить астрономические наблюдения, называется *космологией*. Каждая цивилизация и каждая религия, когда-либо существовавшие на нашей планете, в центр своих представлений о мире ставила какие-либо космологические представления. Характер и содержание любой космологии органически связан с породившей ее культурой. В учениях большинства древних цивилизаций утверждалось, что космологические идеи были сообщены людям самими богами через посредство верховных жрецов или посвященных в тайны культного знания. Позднее, начиная с древних греков, люди стали больше полагаться на непосредственные наблюдения небесных явлений. Вследствие большого разнообразия методов приобретения знаний о Вселенной не приходится удивляться множеству красочных и зачастую противоречивых теорий космоса, господствовавших у разных цивилизаций. Некоторые из этих теорий составлены из мифов и легенд, которые больше говорят нам о психологии данного общества, нежели о физической природе Вселенной. Другие представления демонстрируют зачатки того, что мы сегодня можем назвать «научным методом». Не может ли случиться так, что астрономия и астрофизика XX в. спустя тысячи лет будут восприниматься как фантазия и миф?

Разумеется, космологическая теория зависит от имеющихся наблюдений, и ни один здравомыслящий астроном не станет отрицать, что теории следует изменять или даже отказаться от них, если выявились новые данные. Однако в гораздо более глубоком смысле космология опирается на целый ряд аксиом и предположений, которые часто не проверяются и не подвергаются сомнению. Например, современная психология учит нас, что конкретный способ видения мира зависит от того, каким образом учится ребенок распоряжаться информацией, поступающей через органы чувств, и формулировать свои мысли и представления. Таким образом, человек систематически отсеивает или принимает во внимание определенные данные в соответствии со своей первоначальной психологической установкой. И современные ученые, с видом оскорбленной невинности протестующие против укоров в необъективности, нередко оказываются столь же предвзяты, как и католические священники, осудившие Галилея. Ведь эти прелаты, отклонив приглашение Галилея и отказавшись посмотреть в его телескоп на Луну, Венеру или Юпитер, поступили так просто потому, что такая методология постижения красоты

и гармонии Вселенной была им органически чужда. Подобным же образом современный ученый использует космические корабли серии «Маринер», чтобы узнать, каковы условия на Марсе или Венере, но сама мысль о том, что сведения об этих планетах можно получить при помощи внечувственного восприятия считается абсурдной и смехотворной, если не безумной. Я не собираюсь защищать парапсихологию, а лишь предлагаю подход к теории восприятия и обучения, позволяющий взглянуть на науку с новой точки зрения. В частности, убежденность современных астрономов в том, что их «объективная» наука раскрывает целиком и полностью истинную природу физической реальности, не менее претенциозна и тщеславна, чем утверждение, что Земля является центром Вселенной.

Нельзя не признать, что все мы легко поддаемся чарам современной науки: в конце концов, она исправно функционирует, астрономы могут вычислить, в какой момент завтра взойдет Солнце, и в положенный момент сверкающий солнечный диск появляется над безоблачным горизонтом на востоке. «Пионер-10» передает нам по радио фотографии Юпитера, а астронавты космического корабля «Аполлон» прилуняются в заранее выбранном месте и благополучно возвращаются на Землю.

В современной науке истинно важными считаются лишь те свойства физической реальности, которые можно зарегистрировать и измерить с помощью приборов. Применение таких технических средств, как телескопы, спектроскопы, гальванометры, а также фотопленки, очевидным образом приводит к отсеиванию или включению той части данных, которая предписывается методологией современной науки. Убеждение, что истинная природа действительности сводится к только регистрируемой приборами, нередко низводит современного специалиста на роль «одноглазого, страдающего дальтонизмом созерцателя».

В настоящее время экономика любого индустриального государства опирается на технологию, фундаментом которой являются специализированные отрасли науки. Учитывая современную методологию наук, мы не должны удивляться, что человечество столкнулось с целым рядом кризисов, обусловленных главным образом загрязнением окружающей среды и экологическими проблемами. Мы только начинаем осознавать, что Земля – это замкнутая система. Мы живем в условиях странного парадокса: с одной стороны, развитие техники несет изобилие и процветание, а с другой – опустошает и разоряет огромные пространства на Земле, ставя под угрозу существование грядущих поколений.

Чтобы продолжать существовать на этой планете как жизнеспособный вид, нам необходимо сформулировать новые принципы, на основе которых можно будет развивать науку будущего. Эти новые научные направления должны обладать такой же

точностью и способностью предсказывать новые явления, как и современная наука, но они должны органически учитывать обоюдную связь между человеком и Вселенной, между микрокосмом и макрокосмом. В условиях будущего общества нельзя будет позволить себе роскошь пренебрегать даже отдельными направлениями развития науки. Рядовой гражданин уже теперь не должен сидеть сложа руки, поддавшись уговорам профессиональных ученых и не интересуясь будущими судьбами науки. Профессиональный же ученый должен признать свою моральную ответственность за оповещение широкой публики, чтобы наступление техники не застало нас врасплох, тщетно пытающимися совладать с сомнительными «благодеяниями» плохо постижимых приложений «чистой науки».

По-видимому, астрономия в большей мере, чем любая другая физическая наука, дает нам возможность для осознания вышесказанного. На протяжении столетий многие самые важные и фундаментальные открытия в физике были сделаны благодаря изучению Вселенной. Например, движения планет демонстрируют ученым законы механики в их наиболее чистой и простейшей форме, не искаженные трением и сопротивлением воздуха, действующими в лабораторных условиях. Поэтому неудивительно, что Исааку Ньютону удалось сформулировать основы классической механики благодаря тому, что он постиг сущность движений в Солнечной системе. Не исключено, что тщательно обозрев рубежи современной астрономии, удалось бы предсказать пути развития науки в будущем.

История астрономических наблюдений насчитывает много веков, и астрономия по праву зовется древнейшей из наук. Тем более поразительно, как молоды многие представления о природе Вселенной. Ведь большинство понятий, которые можно встретить в каждой книге по современной астрономии, появилось менее ста лет назад, а многих проблем, обсуждаемых ныне астрономами-профессионалами, вообще не существовало десять – двадцать лет назад. Например, до середины прошлого столетия у астрономов не было четкого представления о расстояниях до звезд. Видимые положения звезд на небе были, конечно, известны уже на протяжении тысячелетий, карты неба имелись почти у каждой цивилизации, и есть данные, что кроманьонский человек пытался изображать созвездия на сводах нещер в южной Европе. Однако непосредственные измерения истинных расстояний до звезд были выполнены только в середине XIX в. Астрономы, конечно, сознавали, что если звезды подобны нашему Солнцу, то они должны находиться на колоссальных расстояниях, поскольку они так слабо светят в ночном небе. Однако измерение этих огромных расстояний было сопряжено с большими практическими трудностями.

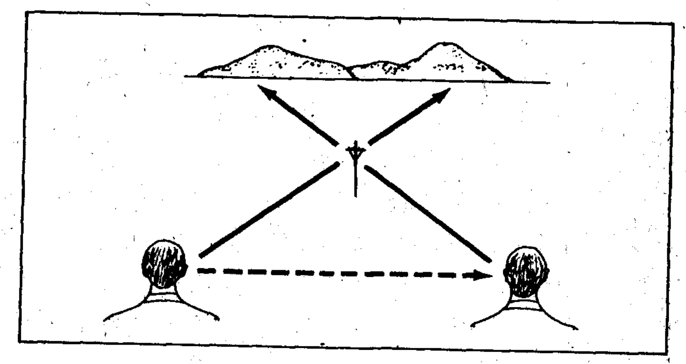


РИС. 1.2.
Параллакс и здравый смысл. Видимое положение близкого предмета (телеграфного столба) относительно далекого фона зависит от положения наблюдателя.

В течение многих столетий был известен и метод измерения расстояний до ближайших звезд. Это метод *тригонометрических параллаксов* следует из повседневного опыта. Посмотрите на предмет, расположенный недалеко от вас, скажем на телеграфный столб, и запомните его положение относительно далекого фона. По мере того как вы будете перемещаться в другую точку, вам будет казаться, что столб движется относительно фона (рис. 1.2). Точно такой же эффект параллакса можно наблюдать и у звезд. Пусть астроном фотографирует одно и то же звездное поле в два момента времени, разделенные интервалом в несколько месяцев. Поскольку Земля движется вокруг Солнца, эти снимки по необходимости будут сделаны из двух различных точек. Если в этом звездном поле имеется близкая звезда, то при сравнении двух снимков ее положение относительно фона далеких звезд окажется смещенным (рис. 1.3), причем смещение обратно пропорционально расстоянию до звезды: чем дальше от нас звезда, тем оно меньше. Измерив параллактическое смещение, астрономы могут сразу же вычислить расстояние до звезды.

Метод тригонометрических параллаксов играет важную роль в астрономии. Это один из тех немногих методов, которые позволяют непосредственно определять расстояния до звезд. Поэтому измерение звездных параллаксов знаменует для нас первый шаг за пределы Солнечной системы, а все последующие шаги так или иначе опираются на этот первый. К тому же большинство других методов определения расстояний косвенные и включают предположения, в справедливости которых можно усом-

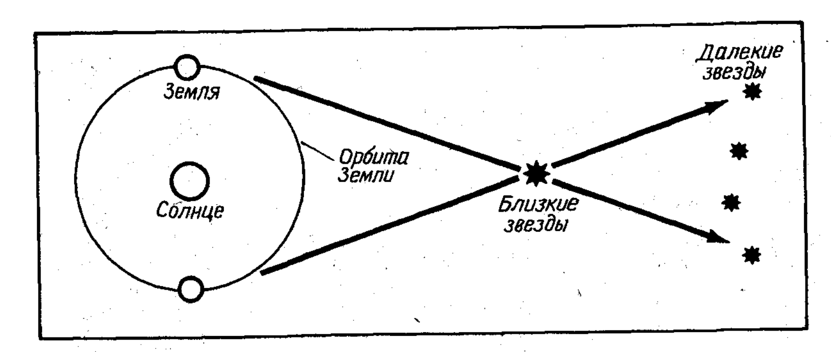


РИС. 1.3.
Параллакс и звезды. При движении Земли вокруг Солнца кажется, что более близкая звезда смещается относительно далеких звезд.

ниться. В методе же тригонометрических параллаксов сомнение может вызывать лишь точность наблюдений.

Главная трудность тригонометрических параллаксов состоит в том, что из-за огромных расстояний до звезд точное измерение их параллактического смещения часто бывает затруднительным. До 1838 г. ученые просто не располагали инструментами, способными обеспечить необходимую точность. Лишь в 1838 г. Фридрих Бессель в Германии измерил параллакс звезды 61 Лебедя. Примерно в это же время Гендерсон на мысе Доброй Надежды и Василий Яковлевич Струве в России измерили параллаксы соответственно звезды α Центавра и Веги.

Если бы вам задали вопрос: «Каково расстояние от Нью-Йорка до Лос-Анджелеса по воздуху?», то вы могли бы выбирать из целого набора правильных ответов. Например, вы могли бы ответить: «155 295 000 дюймов». Конечно, такой ответ очень точен, но звучит нелепо, если не комично, ибо дюйм – это совсем неподходящая единица для выражения расстояний между городами на поверхности Земли. Более удобной единицей измерения здесь будет миля, и предпочтительный ответ на вопрос о расстоянии между Нью-Йорком и Лос-Анджелесом будет «2451 миля».

Когда наконец стали известны расстояния до звезд, потребовалось ввести новые единицы измерения. Выражать эти расстояния в километрах так же нелепо, как выражать расстояния между городами на поверхности Земли в дюймах или миллиметрах. Одна из наиболее удобных измерительных линеек или единиц длины, введенная для этой цели, – световой год. Световой год – это расстояние, которое проходит свет, движущийся со скоростью



РИС. 1.4.

Галактика. Эта фотография галактики в созвездии Эридана была сделана с помощью 5-метрового телескопа обсерватории Маунт-Паломар. Свету, попавшему на фотопластинку, потребовались миллионы лет, чтобы достичь Земли. (Фотография обсерватории Хэйла.)

300 000 км/с*, за один год. Значит, один световой год приблизительно равен десяти триллионам километров.

Оказывается, используя в качестве измерительной линейки световой год, можно выразить расстояния до звезд довольно компактными числами. Например, ближайшая к нам звезда α Центавра находится на расстоянии приблизительно 4 световых лет. Сириус – самая яркая звезда на небе – удалена на 9 световых лет, до Бетельгейзе, яркой красной звезды в созвездии Ориона, 590 световых лет, а до Ригеля, яркой голубой звезды в том же созвездии, 880 световых лет.

Световой год – удобная единица для измерения межзвездных расстояний, и почему бы нам не задуматься, не намекает ли природа тем самым на нечто гораздо более фундаментальное. К примеру, до Альдебарана, яркой красной звезды в созвездии Тельца, 68 световых лет. Это означает, что свет, улавливаемый глазом, когда мы смотрим на эту звезду, был испущен 68 лет назад, т.е. мы видим эту звезду такой, какой она была 68 лет назад, перед первой мировой войной. Еще более далекие звезды мы видим такими, какими они были в еще более далеком прошлом. А когда астрономы фотографируют галактику, находящуюся на расстоянии 90 миллионов световых лет, свет, экспонировавший фотопластинку, начал путешествие к нам, еще когда по Земле бродили динозавры (рис. 1.4). Итак, глядя на ночное небо, мы смотрим в прошлое; взгляд в глубины пространства равносилен взгляду назад во времени. Таким образом, мы пришли к неизбежному выводу, что время и пространство теснейшим образом связаны друг с другом, и, чтобы понять Вселенную, необходимо начать с признания союза пространства и времени как единого континуума, именуемого *пространство-время*. Теперь понятно, что, наблюдая звездное небо подобно многим поколениям наших предков, мы пронизываем взглядом не только все три измерения пространства, но и четвертое измерение – время.

*Скорость света в вакууме равна $2{,}99793 \cdot 10^{10}$ см/с. Для удобства всюду в этой книге мы будем использовать приближенное значение 300 000 км/с.

Что же такое пространство-время? Еще в детстве мы с легкостью усвоили интуитивные представления о пространственных и временном измерениях. Мы узнали, что есть три пространственных измерения – вперед и назад, влево и вправо, вверх и вниз. Мы – трехмерные существа в трехмерном пространстве –

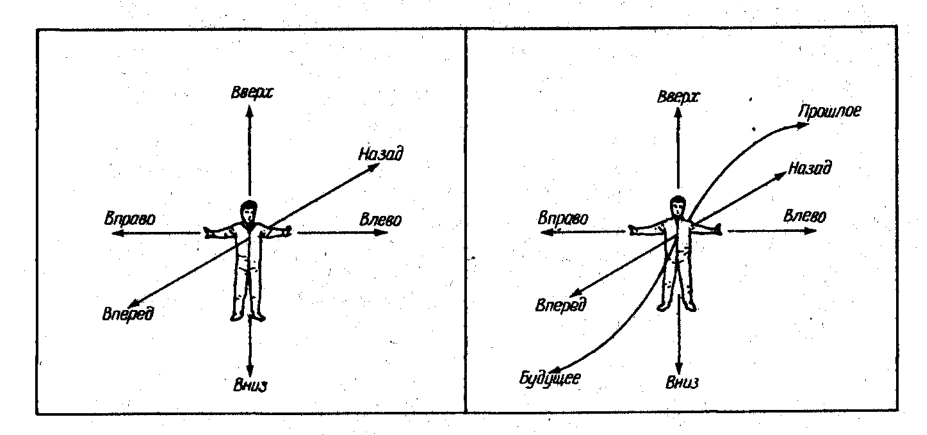


РИС. 1.5.

Пространство и пространство-время. Родившись на свет, старея и умирая, мы являемся трехмерными существами, перемещающимися в четырехмерном пространстве-времени.

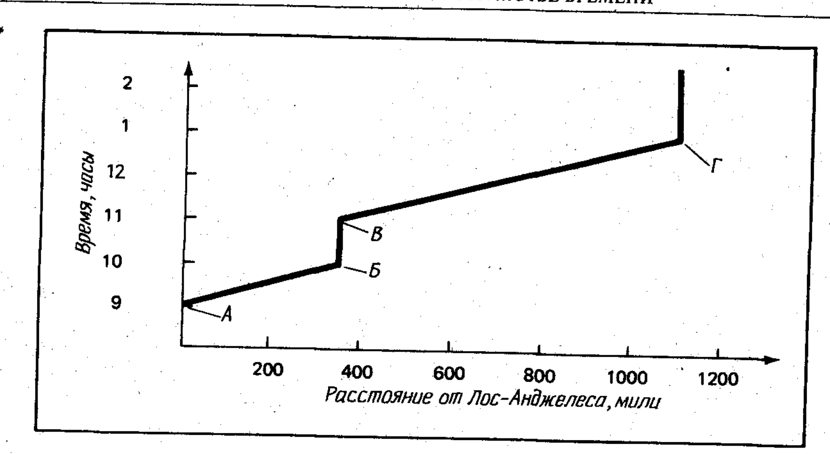


РИС. 1.6.

Пример диаграммы пространства-времени. Путешествие на самолете из Лос-Анджелеса в Сиэтл с посадкой в Сан-Франциско, изображенное с помощью двумерной диаграммы пространства-времени.

вольны перемещаться в любом направлении. Но по мере того, как проходят часы, месяцы и годы, мы перемещаемся также и во времени. Будучи трехмерными существами, мы не вольны двигаться взад и вперед в четвертом измерении – во времени. Мы рождаемся, стареем и умираем, и мы бессильны заставить стрелки часов двигаться назад или ускорить их ход (рис. 1.5).

Смысл пространства-времени лучше всего проиллюстрировать простым примером. Допустим, что вы садитесь в Лос-Анджелесе в самолет, направляющийся в Сиэтл с посадкой на один час в Сан-Франциско. Этот полет можно изобразить графически (рис. 1.6). Будем откладывать по горизонтальной оси расстояние, пройденное самолетом, а по вертикальной оси – время по часам. Вылет из Лос-Анджелеса в 9 ч утра, а прибытие в Сан-Франциско в 10 ч утра. После часовой стоянки ваш самолет летит дальше в Сиэтл, куда прибывает в 13 ч дня. Зная расстояния между этими городами, нетрудно построить окончательный график.

На двумерной диаграмме пространства-времени ось с пометкой «расстояние» указывает ваше положение в пространственном измерении, а ось с пометкой «время» – ваше положение во временном измерении. Ваш путь в таком пространстве-времени (*мировая линия*) показан на рис. 1.6. Когда вы находитесь на земле, мировая линия идет вертикально на диаграмме, так как ваше положение в пространстве остается неизменным, а время продолжает течь. Когда вы находитесь в полете, ваша мировая линия

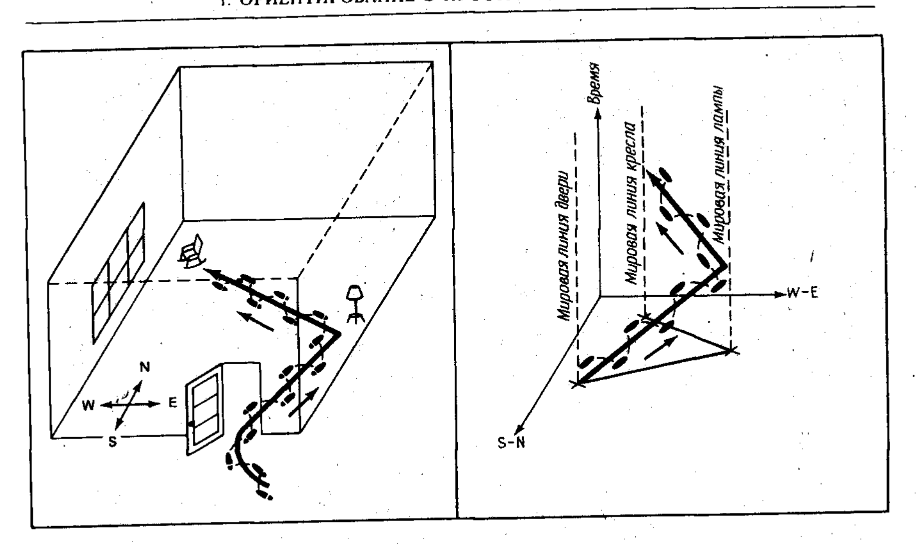


РИС. 1.7.

Трехмерная диаграмма пространства-времени. Человек входит в комнату, подходит к торшеру, а затем к креслу. Слева показан путь человека в обычном пространстве, а справа – его мировая линия в пространстве-времени.

поднимается под углом вправо, ибо с течением времени вы удаляетесь от Лос-Анджелеса.

Аналогично можно построить трехмерную диаграмму пространства-времени. Допустим, вы вошли через дверь в комнату, подошли сначала к торшеру, а затем к креслу. Ваш путь в обычном пространстве выглядел бы тогда, как на рис. 1.7 слева. Чтобы представить ваш путь (мировую линию) в пространстве-времени, потребуется построить трехмерный график. По одной оси этого графика откладывается ваше движение в направлении север–юг, по другой – в направлении восток–запад, и, наконец, третья ось указывает, сколько прошло времени. В таком пространстве-времени мировые линии двери, торшера и кресла суть прямые, параллельные оси времени. Дело в том, что дверь, торшер и кресло не изменяют своего положения в пространстве с течением времени. Вы же проделываете путь, приводящий вас от мировой линии двери сначала к мировой линии торшера, а затем к мировой линии кресла. Как показано на рис. 1.7 справа, ваша мировая линия поднимается все выше и выше, потому что, пока вы ходите по комнате, время течет.

Хотя эти примеры выглядят довольно тривиальными, они

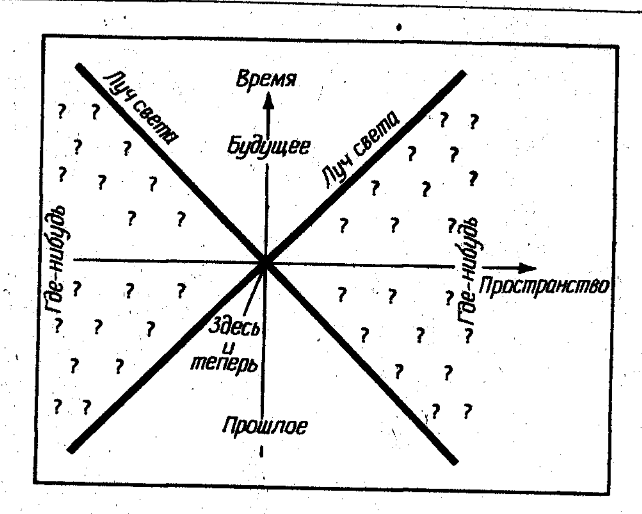


РИС. 1.8.

Абсолютно прошлое, абсолютно будущее и абсолютно удаленное. Физики предпочитают строить диаграммы пространства-времени так, чтобы световые лучи изображались линиями с наклоном 45°. Тогда все пространство-время разбивается на три самостоятельные области: абсолютное прошлое, абсолютное будущее и абсолютно удаленную область.

в очень общей форме показывают, что следует понимать под пространством-временем. Можно было бы построить чертеж и для четырехмерного пространства-времени, но это излишне. Как будет видно на многочисленных примерах, приведенных в этой книге, если вы понимаете, что происходит в двух измерениях, то двумерную картину всегда можно обобщить на три, четыре или более измерений. Именно так и поступают ученые. Физики-теоретики, специалисты по теории относительности, вовсе не обладают какой-то особой способностью представлять себе четыре измерения. Они начинают анализ задачи в двумерном пространстве, а дальше срабатывает их интуиция. Если при этом не будет допущено ошибок, то они всегда могут обобщить свои результаты и уравнения применительно к четырехмерному пространству-времени. Мы увидим, что именно так они и поступают, когда исследуется смысл «искривленного» пространства-времени.

Хотя оба приведенных выше примера иллюстрируют все основные понятия, физики предпочитают рисовать диаграммы пространства-времени немного иначе. Это в самом общем виде показано на рис. 1.8. Как и в рассмотренном примере полета из Лос-Анджелеса в Сиэтл, пространственное измерение откладывается по горизонтальной оси графика, а временное – по его вертикальной оси, однако масштабы на этих осях выбраны очень своеобразно. Если 1 см по вертикали эквивалентен 1 с времени, то 1 см по горизонтали соответствует 300 000 км, т. е. расстоянию, которое свет проходит за 1 с. В результате мировая линия света на такой диаграмме имеет наклон 45°. Обозначим точку в центре диаграммы «здесь и сейчас» («здесь» в пространстве и «сейчас» во времени), тогда все пространство-время естественным образом разобьется на три области: *абсолютное прошлое, абсолютное будущее* и *абсолютно удаленное*. Границы этих областей определяются мировыми линиями световых лучей, проходящих через точку «здесь и сейчас» в центре диаграммы. Смысл названий этих трех областей становится ясным, если вспомнить, что, согласно специальной теории относительности, движение со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, невозможно. Например, из центра диаграммы легко попасть в точку, где стоит буква «щ» в слове «будущее». Времени пройдет много, а преодоленное расстояние будет малым, и скорость при таком путешествии будет меньше скорости света. Однако из этой вершины вам никак не удастся попасть к букве «б» в слове «где-нибудь», ибо для этого пришлось бы преодолеть огромное расстояние за весьма малое время, причем скорость движения превысила бы скорость света.

Поскольку невозможно двигаться со скоростью, равной или

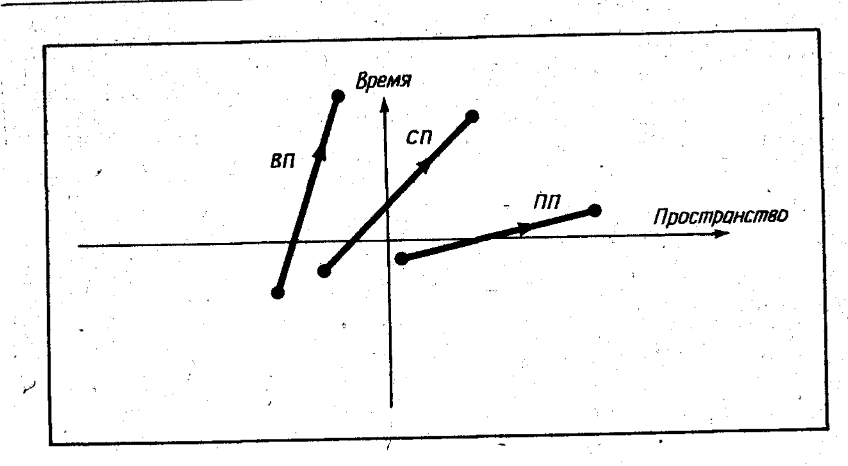


РИС. 1.9.

Три типа траекторий. Поскольку движение быстрее света невозможно, материальные тела движутся только по временноподобным линиям. Свет распространяется по светоподобным мировым линиям, а пространственноподобные пути запрещены.

превышающей скорость света, в таком пространстве-времени разрешены только те мировые линии, наклон которых в любой их точке меньше 45° к вертикали. Это значит, что, выйдя из вершины в центре диаграммы, вы никогда не покинете области абсолютного будущего. Вам никогда не попасть в абсолютно удаленную область. Аналогично, чтобы оказаться в этой вершине, нужно отправиться в путь откуда-нибудь из области абсолютного прошлого. Однако всегда абсолютно удаленная область является для вас запретной.

Выяснив, в каких областях пространства-времени мы можем путешествовать, а какие нам недоступны, мы можем выделить три основных типа мировых линий (рис. 1.9). Из точки *В* можно попасть в точку *П*. Эта мировая линия составляет с вертикалью угол менее 45°, и требуется очень много времени, чтобы преодолеть небольшое расстояние, поэтому ее называют *времениподобной*. Мировая линия, соединяющая точки *С* и *П*, имеет наклон, точно равный 45° относительно вертикали. Из описанного выше принципа построения диаграммы пространства-времени следует, что каждую секунду покрывается расстояние 300 000 км. Скорость космонавта, летящего из *С* в *П*, должна равняться скорости света, и поэтому такая мировая линия называется *светоподобной*. Наконец, наклон линии, соединяющей точки *П* и *П*, к вертикали превышает 45°. По такому «пути» за очень короткий срок во времени «проходится» огромный путь в пространстве, поэтому скорость должна превышать скорость света, и мировая линия называется *пространственноподобной*. Ниже в этой книге мы часто будем пользоваться такими диаграммами пространства-времени.

Все вещество во Вселенной движется лишь по времениподобным мировым линиям в четырехмерном пространственно-временном континууме. Из специальной теории относительности, как из всей совокупности наших знаний о Вселенной, следует, что невозможно разогнать вещество до скорости света или до скорости, превышающей ее, поэтому светоподобные и пространственноподобные мировые линии всегда под запретом. Чтобы лучше разобраться в этом, познакомимся с основными представлениями специальной теории относительности.

2

ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ И СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Совершим небольшой экскурс в историю. Представим себе путь человечества за последние десять тысяч лет – от древнейших цивилизаций на берегах Инда и Евфрата до путешествий астронавтов с космических кораблей «Аполлон» по лунной поверхности. В этой ретроспективе выделяются события, течения и тенденции развития, имеющие решающее значение или важные последствия для человечества. Конечно, исторически важные события наиболее очевидны, к примеру изобретение письменности или взрыв атомной бомбы. Направления и тенденции развития событий, как правило, выявляются постепенно – например, упадок Римской империи или быстрый рост народонаселения на протяжении XX в.

Сегодня, оглянувшись вокруг, мы обнаруживаем, что открытие свойств и практическое применение электричества венчают список исторически важных событий. Электричество играет важную роль почти во всех сферах человеческой жизни: в быту и на работе, от средств связи до развлечений. А ведь каких-нибудь сто лет назад все обстояло иначе. Вплоть до начала XIX в. электричество ассоциировалось с лейденскими банками, бумажным змеем Бенджамина Франклина и судорогой в руке, если взяться за дверную ручку, походив по толстому ковру. Лишь в начале XIX в. началось серьезное экспериментальное изучение электричества. Важнейшими опытами, которые выявили фундаментальные свойства электричества, были, видимо, опыты Майкла Фарадея и Ганса Кристиана Эрстеда. Почти случайно было обнаружено, что электрический ток, текущий по проводу, генерирует магнитное поле. Действительно, если поместить карманный компас вблизи проводника, по которому течет электрический ток, то стрелка компаса отклонится от направления на север. До этого открытия электричество и магнетизм считались совершенно несвязанными явлениями. Электричество ассоциировалось с молнией, а магнетизм – со странными свойствами некоторых железных руд. Однако благодаря работам Фарадея и Эрстеда стало очевидно, что эти два явления тесно связаны между собой.

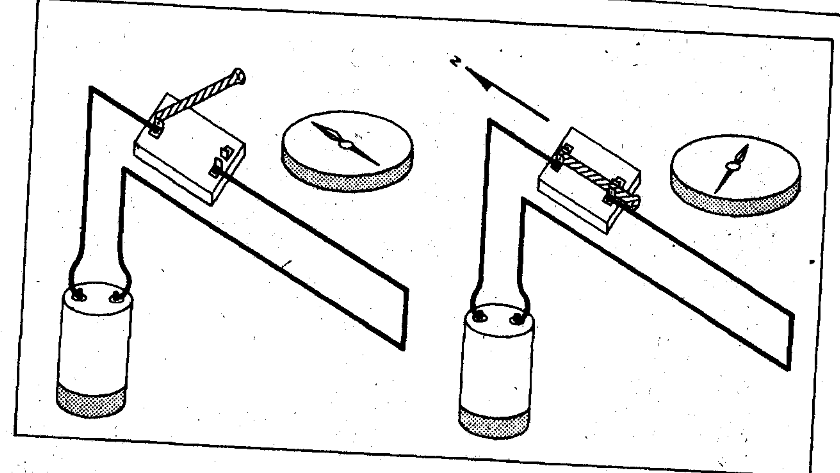


РИС. 2.1.

Эксперимент Эрстеда: электричество порождает магнитное поле. Когда по проводнику течет электрический ток, вокруг проводника возникает магнитное поле. Об этом свидетельствует изменение направления стрелки компаса до и после включения рубильника.

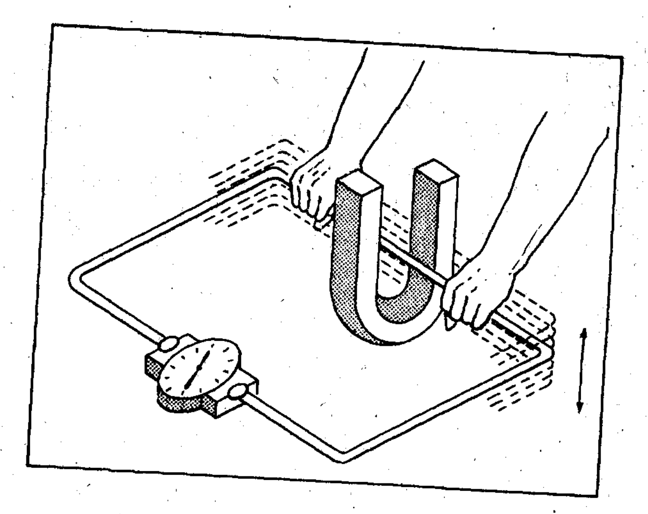


РИС. 2.2.

Магнитное поле порождает электрический ток (опыт Фарадея). При движении проволочной петли в магнитном поле в ней возникает электрический ток.

Оказалось, что всякий раз, когда приводятся в движение электрические заряды, возникает магнитное поле (рис. 2.1).

В начале XIX в. было также открыто и обратное явление: изменение магнитного поля или движение в нем приводит к появлению электрического поля даже в отсутствие электрических зарядов. Если, например, перемещать между полюсами подковообразного магнита проволочную петлю, то по ней потечет электрический ток (рис. 2.2). В этом состоит принцип работы электрогенератора.

Эти фундаментальные открытия повлекли за собой множество экспериментов и исследований, апогеем которых был труд великого шотландского физика Джеймса Клерка Максвелла. За 9 лет (с 1865 по 1873 г.) Максвеллу удалось выразить все накопленные знания об электричестве и магнетизме в виде четырех простых уравнений. Эти четыре уравнения, составившие основу *теории электромагнетизма*, включают практически всю информацию о свойствах и взаимосвязях электрических и магнитных явлений. Чтобы прийти к окончательному результату, объединяющему эти явления, Максвеллу пришлось встать на революционную по тем временам точку зрения: наличие электрических зарядов или магнитов коренным образом изменяет свойства пространства около этих зарядов или магнитов. Согласно Максвеллу, в пространстве возникают «натяжения», соответствующие электрическому или магнитному *полям*. Поэтому четыре уравнения Максвелла (рис. 2.3) часто называют *уравнениями электромагнитного поля*. Так впервые в истории науки появилось понятие поля. До работ Максвелла в классической физике считалось, что материальные тела непосредственно действуют друг на друга на расстоянии, без посредничества пространства между ними. Теперь же ученые поняли, что свойства пространства вокруг тел изменяются из-за присутствия самих тел.

Теория электромагнетизма привела во второй половине прошлого столетия к замечательному открытию: оказалось, что из четырех уравнений Максвелла можно получить *волновое уравнение*, описывающее свойства света. Это волновое уравнение таило в себе много неожиданного. Во-первых, оно совершенно по-новому интерпретировало свет: его луч представляет собой одновременные колебания перпендикулярных друг другу электрического и магнитного полей (рис. 2.4). Следовательно, свет можно рассматривать как *электромагнитное излучение*. Расстояние между горбами или впадинами двух последовательных волн называется *длиной волны* излучения.

Во-вторых, выяснилось, что уравнение электромагнитной волны не накладывает никаких ограничений или условий на длину волны описываемого им излучения. Но из опыта физикам было известно, что обычный видимый свет соответствует очень узкому

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot D = \rho$$
$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$
$$\nabla \cdot B = 0$$

РИС. 2.3.

Уравнения Максвелла. Эти четыре простых уравнения полностью описывают всю совокупность взаимосвязей между электричеством и магнетизмом.

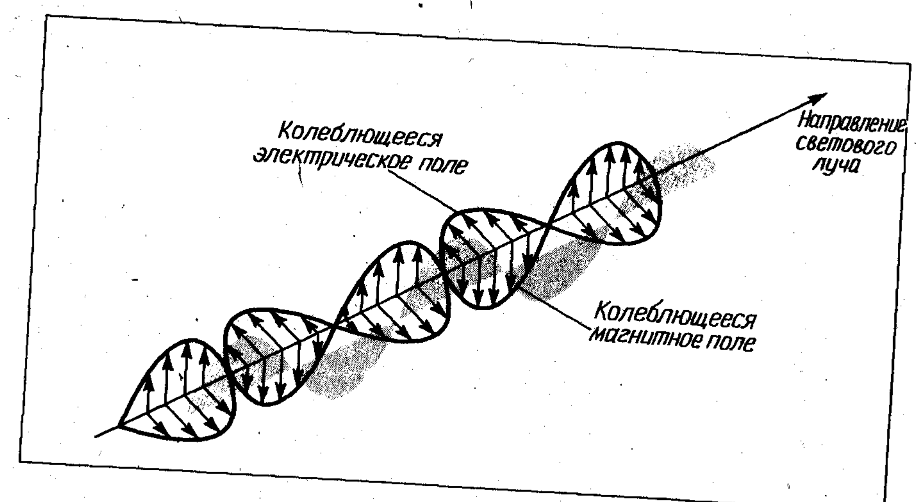


РИС. 2.4.

Электромагнитное излучение. Согласно уравнениям Максвелла, свет любой длины волны можно представить как колебания электрического и магнитного полей.

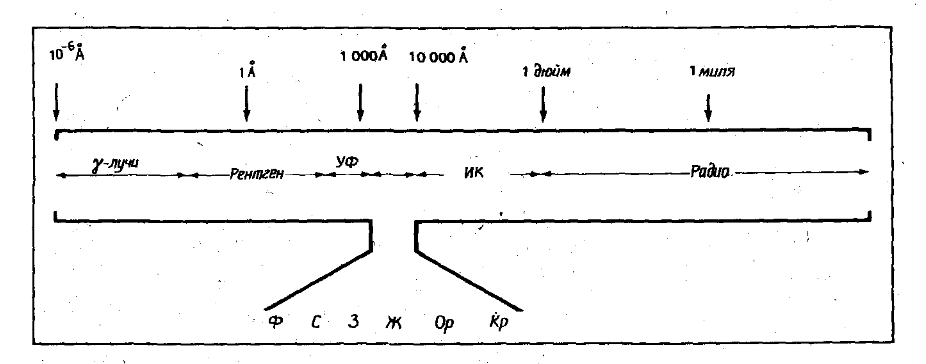


РИС. 2.5.

Электромагнитный спектр. Электромагнитное излучение охватывает весь диапазон от чрезвычайно коротковолновых гамма-лучей до очень длинных радиоволн. Обратите внимание на то, что видимый свет занимает лишь малую долю спектра.

диапазону длин волн. Таким образом, волновое уравнение предсказывало существование совершенно неизвестных видов электромагнитного излучения, длины волн которых на много порядков величины больше или меньше, чем у видимого света. На протяжении десятилетий после этого теоретического предсказания было открыто много новых видов электромагнитного излучения, которые стали для нас привычными. Например, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения имеют длины волн короче, чем у видимого света, а инфракрасное и радиоизлучение являются более длинноволновыми. Все эти виды излучения, включая и видимый свет, образуют *электромагнитный спектр* (рис. 2.5).

Наконец, одно из самых непонятных свойств электромагнитного волнового уравнения состояло в том, что при выводе его из уравнений поля Максвелла некоторые коэффициенты объединились и дали число, согласно экспериментам равное 300 000 км/с. Другими словами, с волновым уравнением неразрывно связана скорость, которую обычно обозначают латинской буквой *c* и отождествляют со скоростью света. Трудно переоценить значение этого исключительного факта. Впервые в истории науки при описании явлений природы на самом фундаментальном уровне появилась скорость. Появление в теории величины *c* повлияло почти на все понятия и представления о Вселенной, включая интуитивные представления о пространстве, времени и материи.

На первый взгляд присутствие *c* в волновом уравнении говорит о том, что всякое электромагнитное излучение должно рас-

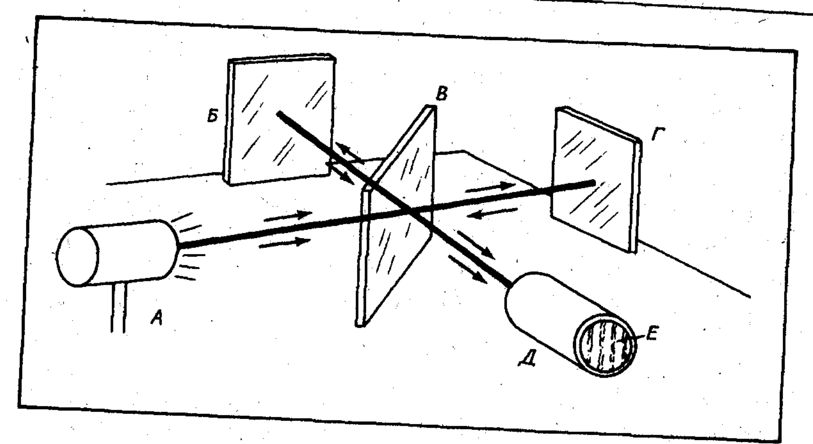


РИС. 2.6.

Опыт Майкельсона–Морли. (Схема интерферометра). Такая экспериментальная установка использовалась Майкельсоном и Морли в их безуспешной попытке обнаружить движение Земли относительно эфира. Отрицательный результат опыта показал, что в классической физике что-то неладно.

пространяться со скоростью 300 000 км/с. Но после минутного размышления мы понимаем, что пора спросить: «Как?» и «Относительно чего?» Звуковые волны распространяются в воздухе, океанские волны – в воде, а в какой среде распространяются электромагнитные волны? Чтобы ответить на этот вопрос, физики XIX в. постулировали существование всепроникающей среды – *эфира*. Этот загадочный эфир не взаимодействовал ни с чем в материальном мире, и вся его роль сводилась к роли переносчика электромагнитных волн. Логично было заключить, что c – это скорость света относительно загадочного эфира.

В 1880-х годах появилась идея: а нельзя ли измерить скорость движения Земли относительно гипотетического эфира? Ведь эфир должен заполнять всю Вселенную – иначе как мог бы доходить до нас свет от звезд? К тому же Земля обращается вокруг Солнца, так что каждые 6 месяцев она, очевидно, должна менять направление движения относительно эфирного океана на противоположное.

Два американских физика, Альберт А. Майкельсон и Эдвард У. Морли, поставили конкретный опыт, с помощью которого можно было бы измерить скорость движения Земли относительно эфира. Схема прибора, который называется *интерферометром Майкельсона*, показана на рис. 2.6. Источник света испускает луч по направлению к центру прибора, где расположен делитель пучка света, позволяющий половине пучка света пройти дальше

и попасть на зеркало *А*, тогда как другая половина отражается под прямым углом на зеркало *В*. Оптические расстояния между делителем луча и обоими зеркалами должны быть с высокой точностью одинаковыми. После того как свет отразится от зеркал *А* и *В*, два получившихся луча возвращаются к центру прибора. Часть луча от зеркала *В* проходит через делитель и смешивается с частью луча от зеркала *А*, и свет направляется в небольшой телескоп. Из классической оптики хорошо известно, что когда два луча вместе приходят к конечной точке своего путешествия, они интерферируют друг с другом, образуя систему *интерференционных полос*. Эту интерференционную картину легко наблюдать с помощью небольшого телескопа.

Сущность эксперимента Майкельсона–Морли в том, что если прибор будет оставаться фиксированным, то естественное вращение Земли вокруг оси будет постоянно изменять направление плеч интерферометра в течение суток. Если, например, в 6 ч утра направление к зеркалу *А* параллельно, а направление на зеркало *В* – перпендикулярно направлению движения Земли по орбите, то 6 ч спустя, в 12 ч дня, будет наблюдаться противоположная картина. Другими словами, в 6 ч утра свет идет к зеркалу *А* и обратно параллельно, а свет к зеркалу *В* – перпендикулярно потоку эфира относительно Земли. Но в полдень свет, идущий к зеркалу *А* и от него, будет двигаться перпендикулярно потоку эфира, тогда как свет к зеркалу *В* и от него будет идти параллельно этому потоку. Такое изменение ориентации плеч интерферометра должно приводить к вполне заметному сдвигу интерференционных полос, наблюдаемых в телескоп. Именно так Майкельсон и Морли надеялись обнаружить движение Земли относительно эфира.

Чтобы лучше разобраться в этом эксперименте, представим себе двух пловцов, скорости которых в неподвижной воде в точности совпадает. Организуем состязание между этими спортсменами. Местом старта пусть будет речная пристань (рис. 2.7). Пусть один пловец переплывет реку и возвратится обратно (поперек течения), а второй проплывет такое же расстояние вниз по течению и возвратится обратно (параллельно течению). Если бы течение отсутствовало, то состязание, очевидно, закончилось бы вничью. Простой расчет, однако, показывает, что благодаря тому, что река течет, обязательно победит первый пловец (т. е. совершающий заплыв поперек течения). Всегда требуется меньше времени, чтобы переплыть реку туда и обратно, чем проплыть такое же расстояние вниз по течению и обратно.

Точно такое же положение должно иметь место и в опыте Майкельсона–Морли. Как только свет испускается источником в интерферометре, он как бы погружается в реку эфира, текущую мимо Земли вследствие ее движения по орбите. По аналогии с рассмотренным примером о двух пловцах всегда должен «по-

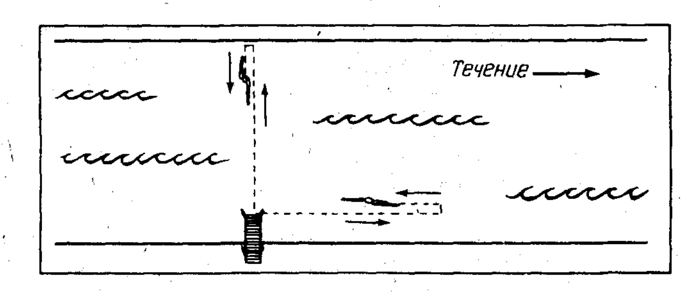


РИС. 2.7.

Пловцы и река. Состязание двух пловцов, имеющих одинаковую скорость в неподвижной воде. Всегда побеждает тот, кто переплывает реку поперек течения.

беждать» свет, распространяющийся от делителя луча до зеркала и обратно перпендикулярно направлению движения Земли по орбите, а вследствие вращения Земли вокруг своей оси каждые шесть часов «победитель» и «побежденный» будут меняться. Именно эта смена «лидера» и должна приводить к регулярному сдвигу интерференционных полос, ожидавшемуся Майкельсоном.

Опыт Майкельсона был впервые поставлен в 1880 г., и, к всеобщему удивлению, не было обнаружено сколько-нибудь заметного сдвига интерференционных полос. Отсюда следовало, что либо Земля неподвижна, либо эфира не существует, а значит, в наших представлениях о природе кроется фундаментальная ошибка.

Хотя мы подошли к проблеме о наличии в волновом уравнении постоянной величины c с экспериментальной точки зрения, отметим, что и в теории также имеется множество трудностей. Рассмотрим, к примеру, лампу-вспышку, применяемую в фотографии. Когда она срабатывает, во всех направлениях начинает распространяться сферическая оболочка света. Но, согласно классической теории, *сферическим* его видит только тот, кто держит эту лампу (т. е. наблюдатель, покоящийся относительно источника света), а тот, кто находится в движении относительно лампы-вспышки, должен видеть *эллипсоидальную* оболочку света, распространяющегося от источника. Если нечто в одно и то же время является и сферическим, и несферическим, то это парадокс для привычного образа мышления.

В 1905 г. молодому немецкому физику, служившему в патентном бюро в Швейцарии, удалось сформулировать новую и абсолютно последовательную теорию о том, как нужно толковать описанный выше эксперимент. Эта теория – специальная теория относительности – была предназначена для того, чтобы устра-

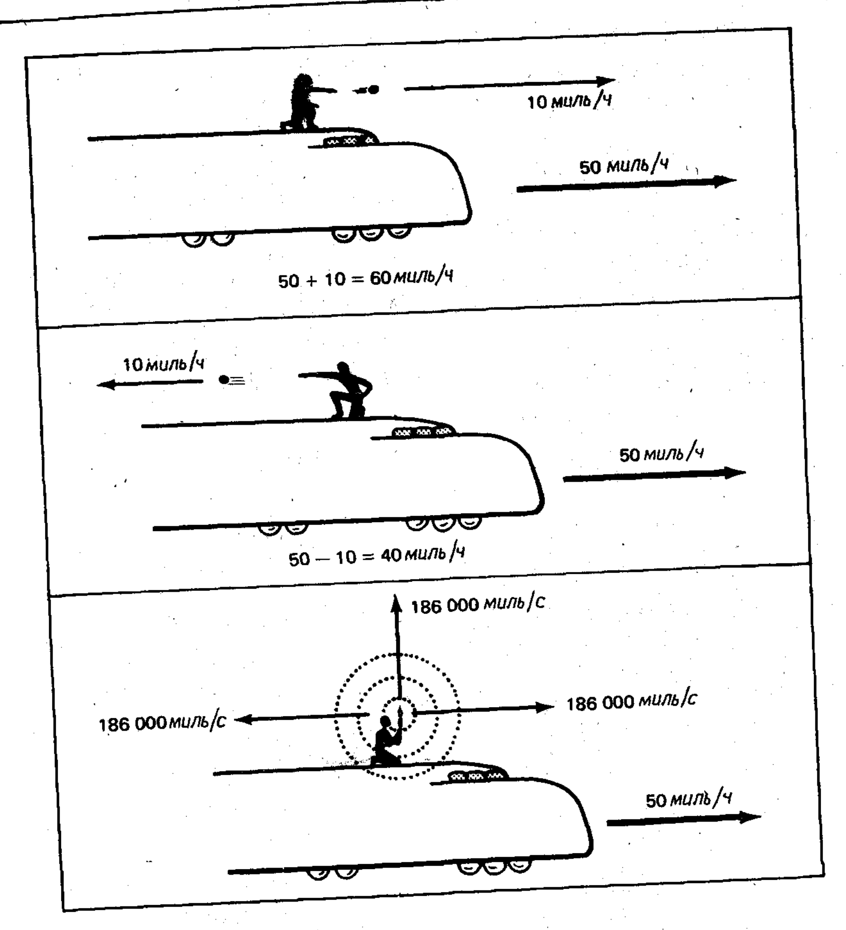


РИС. 2.8.

Камни, поезд и свеча. Согласно здравому смыслу, скорость камня (относительно земли), брошенного человеком с крыши поезда, зависела от скорости поезда. Однако скорость света не зависит от скорости движения его источника.

нить все трудности, связанные с постоянной c в теории электромагнетизма. Альберт Эйнштейн начал с фундаментального и далеко идущего предположения: *скорость света в вакууме является абсолютной константой*. Другими словами, кто бы ни измерял скорость света, всегда будет получаться один и тот же результат независимо от того, как движутся относительно друг друга источник света и наблюдатель. Иначе этот постулат можно сформулировать следующим образом: скорость света не зависит от скоростей как источника, так и наблюдателя.

Это утверждение в корне противоречит нашей интуиции и повседневному опыту. Представим себе, например, человека, сидящего на крыше поезда, движущегося со скоростью 50 км/ч (рис. 2.8). Пусть человек бросает в направлении движения поезда камень со скоростью 10 км/ч. С точки зрения наблюдателя, стоящего около железнодорожного полотна, скорость камня составит 60 км/ч (скорость поезда 50 км/ч плюс 10 км/ч составит скорость камня относительно поезда). Так подсказывает здравый смысл. Аналогично если человек на крыше поезда повернется лицом в противоположную сторону и бросит такой же камень с той же силой в направлении хвоста поезда, то для наблюдателя, стоящего у путей, камень будет лететь со скоростью 40 км/ч (скорость поезда 50 км/ч минус 10 км/ч – скорость камня относительно поезда). Это также соответствует здравому смыслу. Однако если человек на крыше поезда зажжет фонарь, то и для него, и для наблюдателя, стоящего у железнодорожного полотна, свет будет распространяться во всех направлениях с одной и той же скоростью 300 000 км/с независимо от того, с какой скоростью и в каком направлении движется поезд. Чтобы прийти к такому выводу, им обоим придется отказаться от многих своих интуитивных представлений о пространстве и времени.

В общих чертах специальную теорию относительности можно построить непосредственно из предположения об абсолютном постоянстве скорости света. Представим себе такой эксперимент: пусть некто включает лампу-вспышку. Для него (Андрей на рис. 2.9) свет распространяется в виде сферической оболочки с одной и той же скоростью 300 000 км/с во всех направлениях. Согласно постулату Эйнштейна, для любого наблюдателя эта оболочка расширяется со скоростью 300 000 км/с. Иными словами, каждый из них (Борис, Василий и Мария на рис. 2.9) видит расширяющуюся сферическую оболочку света. Чтобы все наблюдатели независимо от того, как они движутся, видели сферическую оболочку, приходится отказаться от классических представлений о природе измерений времени и расстояний. В частности, из требования, чтобы для любых двух наблюдателей, движущихся относительно друг друга, оболочка оставалась сферической, следует, что их мерные линейки и ход часов не совпадают. Каждый будет утверждать, что часы его партнера отстают, а линейки измеряют разную длину в разных направлениях.

В основе специальной теории относительности лежит система математических соотношений, носящих название *преобразований Лоренца*. Эти соотношения указывают, как представляются разным наблюдателям, движущимся относительно друг друга, те или иные явления. Например, теория *предсказывает*, что для покоящегося наблюдателя движущиеся часы будут отставать. Этот эффект иногда называют *замедлением времени*. Иначе говоря, если вы будете поддерживать двухстороннюю связь с космонавтом, который с большой скоростью пролетает через Солнечную систему, то обнаружите, что все часы на борту корабля отстают по сравнению с вашими. Покоясь на Земле, вы заключите, что для движущегося космонавта время замедлилось. Такое заключение с необходимостью следует из предположения, что скорость света – абсолютная постоянная. Если и вы, и космонавт, измеряя скорость света, должны получить в точности один и тот же результат, то с вашей точки зрения часы космонавта должны отставать.

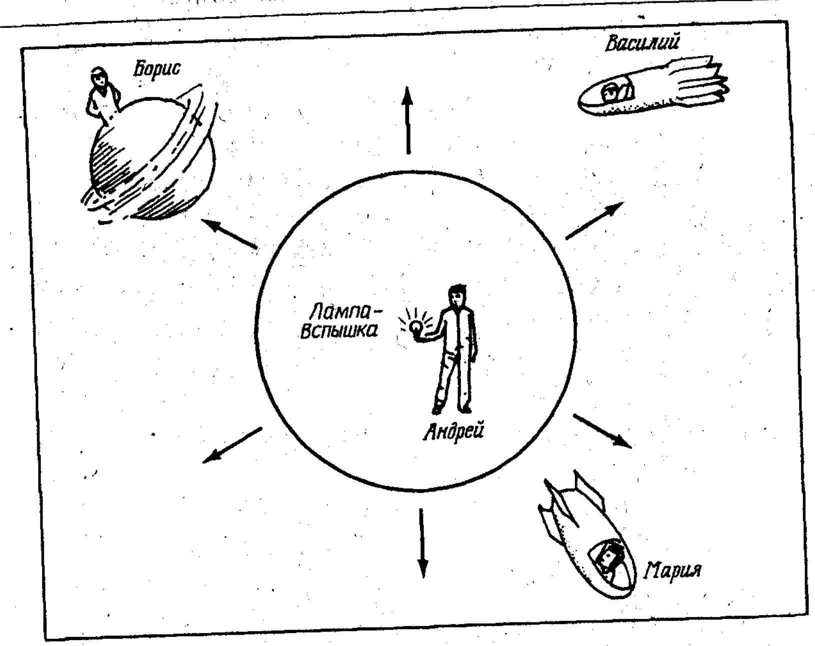


РИС. 2.9.
Расширяющаяся световая оболочка. В соответствии с предположением об абсолютном постоянстве скорости света наблюдатели согласятся, что они видят сферическую расширяющуюся световую оболочку. Но они не смогут прийти к согласию относительно скорости хода их часов или длины линеек.

На рис. 2.10 графически изображено преобразование Лоренца для времени. В частности, этот график отвечает на вопрос, сколько длится 1 с по движущимся часам с точки зрения часов покоящихся. К примеру, если космонавт пролетает мимо вас со скоростью, равной 60% скорости света, то 1 с по его часам равна 1,2 с по вашим часам. Из этого же графика видно, что эффект замедления течения времени становится существенным лишь при субсветовых скоростях. По мере того как скорость движения часов стремится к скорости света, это замедление становится

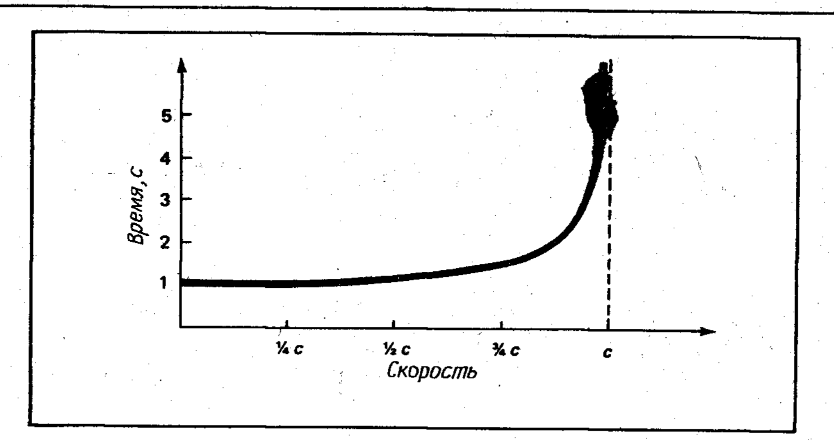


РИС. 2.10.
Замедление течения времени. Преобразования Лоренца предсказывают, что интервалы времени, измеренные движущимися часами, должны быть длиннее, чем такие же интервалы, измеренные покоящимися часами.

в пределе бесконечно большим, и при достижении скорости света время останавливается вообще.

Эффект замедления течения времени приводит к ряду трудностей и парадоксов понятийного характера. Если, например, вы скажете своей приятельнице, что ее часы отстают, то она может возразить, что ее часы идут правильно, а вот ваши часы спешат. Если же два космонавта пролетают мимо друг друга на большой скорости, то, согласно теории относительности, каждый из них может считать себя покоящимся, так что отстают часы каждого партнера.

Продолжив эти рассуждения, рассмотрим межзвездный перелет с субсветовой скоростью. Допустим, что двое молодых людей, живущих на Земле, Андрей и Борис, которым по 20 лет, имеют космический корабль, способный развивать скорость, равную 98% скорости света (рис. 2.11). Они собираются совершить путешествие к звезде, расположенной в 25 световых годах от Земли, и обратно, но Андрей решает остаться дома, а Борис садится в корабль и отправляется в путь один. Наш космонавт преодолевает все расстояние туда и обратно, равное 50 световым годам, с постоянной скоростью, равной 98% скорости света. Для Андрея, оставшегося на Земле, часы Бориса замедлили свой ход, и, согласно преобразованию Лоренца, 1 с по часам Бориса длится 5 с по часам Андрея (см. рис. 2.10). Поскольку Борис летел со скоростью, очень близкой к световой, весь путь, равный 50 световым годам, он проделал за 51 год по часам, остававшимся на

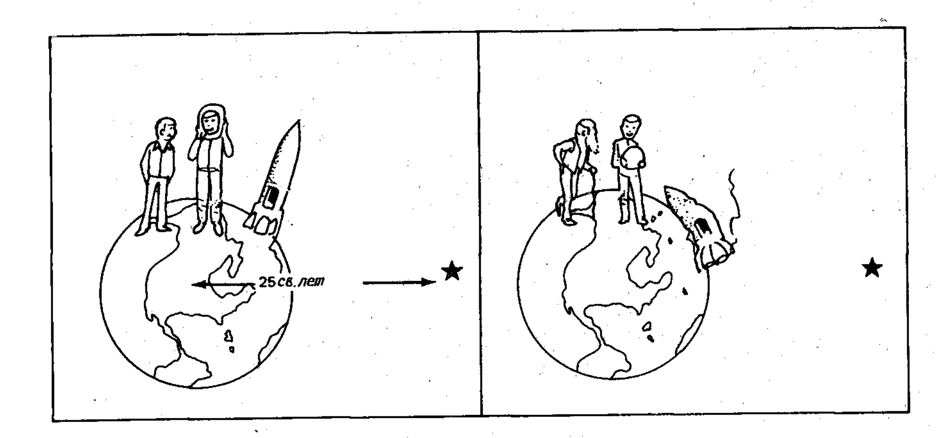


РИС. 2.11.
Андрей и Борис. Андрей остается на Земле, а Борис летит со скоростью, равной 98% скорости света к звезде, находящейся на расстоянии 25 световых лет от Земли, и возвращается обратно. Хотя они расстаются, когда им обоим по 20 лет, к моменту встречи Андрею будет 71 год, а Борису только 30 лет.

Земле. Поэтому к тому времени, когда Борис завершит свое путешествие, *Андрею будет 71 год.* С другой стороны, поскольку на космическом корабле течение времени замедлялось, для Бориса прошло всего 10 лет. В результате по возвращении на Землю *Борису будет лишь 30 лет.*

Это воображаемое путешествие можно рассмотреть и таким образом, что каждый персонаж считает себя покоящимся, так что часы его партнера замедлялись. Тогда становится неясно, кто же в конце концов станет старше, и мы придем к знаменитому *парадоксу близнецов.* Однако в случае Андрея и Бориса ясно, кто двигался, а кто нет (в ракету ведь садился только один из них), так что парадокса не возникает*.

Из преобразования Лоренца вытекают также конкретные следствия об изменениях длины и массы в зависимости от скорости относительно различных наблюдателей. В частности, для покоящегося наблюдателя мерные линейки движущегося космонавта сокращаются по длине, если их расположить в направлении движения. Этот эффект, иногда называемый сокращением масштабов Лоренца–Фитцджеральда, особенно усиливается с приближением к скорости света (рис. 2.12). При скорости, равной скоро-

*Подробнее о «парадоксе близнецов» см. Л. Мардер. Парадокс часов.– М.: Мир, 1974.– *Прим. перев.*

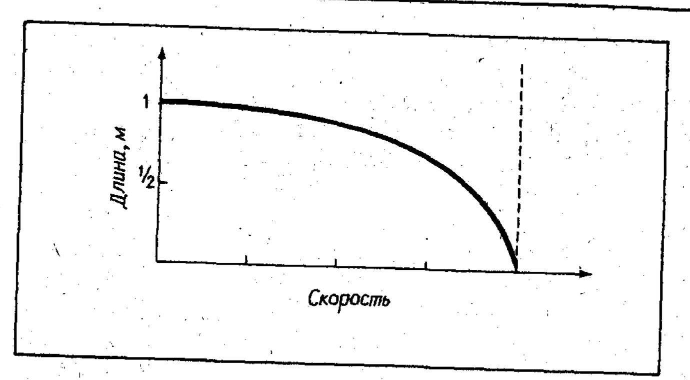


РИС. 2.12.

Сокращение масштабов Лоренца–Фитцджеральда. С точки зрения покоящегося наблюдателя, расстояния, измеренные движущимся наблюдателем, сокращаются в направлении движения.

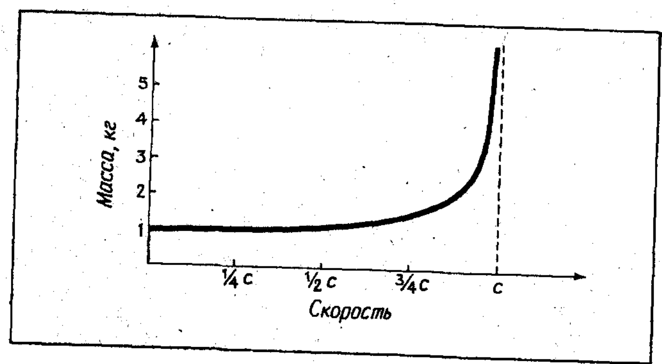


РИС. 2.13.

Относительность массы. С точки зрения покоящегося наблюдателя, масса движущегося предмета возрастает при увеличении его скорости.

сти света, длина мерных линеек космонавта, согласно теории, равна нулю. Массы же предметов, движущихся с большими скоростями относительно покоящегося наблюдателя, увеличиваются. Если же частица движется со скоростью света, то, согласно теории относительности, ее масса становится бесконечно большой (рис. 2.13).

Эти предсказания специальной теории относительности были проверены с очень большой степенью точности в лабораторных условиях на ускорителях (циклотронах, бетатронах, синхротронах и других), разгоняющих элементарные частицы до скоростей,

весьма близких к скорости света. Было бы невозможно разобраться во многих экспериментах по ядерной физике, если бы исследователи не учитывали влияния скорости движения на течение времени, расстояние и массу.

Итак, теперь ясно, почему нельзя достичь скорости света или превысить ее. Представим себе ракету, имеющую неограниченные запасы горючего. Стартовав с Земли, она движется ускоренно. Однако по мере приближения ее скорости к скорости света начинает сказываться замедление течения времени, и наблюдатель на Земле замечает, что скорость, с которой двигатели ракеты сжигают горючее, начинает уменьшаться. Когда ракета достигнет субсветовой скорости, ее двигатели как бы выключаются. Эффекта замедления времени как раз и достаточно, чтобы космонавту никогда не удалось израсходовать те несколько литров горючего, которые необходимы, чтобы разогнать ракету на несколько километров в секунду, оставшихся до заветной скорости света. Иначе говоря, из-за замедления времени космонавту пришлось бы трудиться бесконечное число лет, чтобы сжечь количество горючего, необходимое для достижения скорости света. Любой тип реактивных двигателей всегда будет наталкиваться на это непреодолимое препятствие.

Если один космонавт не в состоянии достичь скорости света, то не могут ли два космонавта вылететь с Земли таким образом, чтобы преодолеть «световой барьер»? Пусть два космонавта покидают Землю и летят в противоположных направлениях (рис. 2.14). Пусть каждый из них удаляется от Земли со скоростью, равной 95% скорости света. Итак, все согласны, что

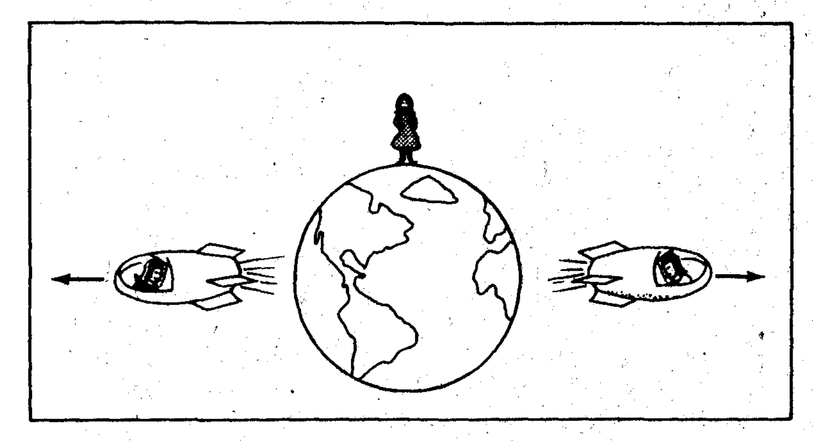


РИС. 2.14.

Как превзойти скорость света? Всевозможные ухищрения, предназначенные для преодоления скорости света (с точки зрения здравого смысла), терпят неудачу.

каждый космонавт движется относительно Земли со скоростью, равной 95% скорости света; но с какой же скоростью будут лететь они относительно друг друга? Обыденный «здравый» смысл подсказывает, что относительная скорость космонавтов должна быть больше 300 000 км/с. Если, однако, рассмотреть эту задачу в рамках специальной теории относительности, то окажется, что здравый смысл нас подвел. Преобразования Лоренца для скоростей показывают, что относительная скорость наших космонавтов равна 99,9% скорости света. Замедление времени действует так исправно, что наши маленькие хитрости, придуманные для того, чтобы преодолеть скорость света, оказываются бессильными.

В этой связи нужно сказать, что авторы многих научно-фантастических произведений отправляют своих героев и героинь в космические полеты в гипотетических ракетах, развивающих скорости, во много раз превосходящие световую, а сторонники «летающих тарелок», которые верят, что Землю посещали пришельцы из космоса, часто обсуждают возможности космических путешествий со сверхсветовыми скоростями. Эти люди, наверное, сами не понимают, к чему ведут их утверждения.

Все здание современной физики органически связано с выводами из специальной теории относительности. Эти выводы свидетельствуют о том, что скорость света является барьером, который невозможно преодолеть ни при каких обстоятельствах. Писатели-фантасты и сторонники летающих тарелок выдвигают возражение, что наука может ошибаться. Может быть, через десятки или сотни лет ученые придут к новым теориям, которые будут допускать путешествия со сверхсветовыми скоростями. Хотя и невозможно предсказать, какой станет наука через тысячи лет, попытаемся оценить некоторые последствия «теории сверхотносительности». В частности, световой барьер является столь неотъемлемой частью современной науки, что любая корректная теория, допускающая сверхсветовое космическое путешествие, произвела бы поистине революционный переворот в понимании окружающего мира. Эта революция имела бы гораздо более глубокие и далеко идущие последствия, чем любая предыдущая революция в науке. Разрыв в уровне интеллекта между нами и будущими космонавтами, способными летать быстрее света, будет с необходимостью столь же велик, как между доисторическим человеком и современным физиком-ядерщиком. Нет ничего самонадеяннее, чем думать, что мы можем вообразить, какими будут сами эти космонавты или их поступки. Писателя-фантаста, герои которого путешествуют быстрее света, можно уподобить древнеегипетскому писателю, который бы попытался написать рассказ о посадке самолета «Боинг-747» в Международном аэропорту имени Кеннеди.

3

СЛЕДСТВИЯ ЧАСТНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Основы всей физической науки были поколеблены в 1905 г., когда молодой никому не известный физик опубликовал небольшую научную статью под названием «Zur Elektrodynamik bewegter Körper». [«К электродинамике движущихся тел».] В этой исторической статье Альберту Эйнштейну удалось разрешить все трудности, связанные с теорией электромагнетизма Максвелла. В частности, Эйнштейн переформулировал физику таким образом, чтобы основные законы природы были одинаковы для всех наблюдателей независимо от того, как они движутся относительно друг друга. Заключение о том, что законы природы должны быть одинаковыми для всех, называется *принципом ковариантности*. Если математические уравнения физики записаны таким образом, что они не зависят от движения наблюдателя, то говорят, что эти фундаментальные уравнения записаны в *ковариантном* виде. За столь изящный подход к физической реальности приходится платить довольно дорогой ценой: для разных наблюдателей некоторые основные величины, такие, как масса, время и длина, оказываются неодинаковыми.

А вот пример, позволяющий лучше постичь смысл ковариантной формулировки теории электромагнетизма. Пусть Андрей стоит около электрически заряженного металлического шара (рис. 3.1). Он будет наблюдать просто электрическое поле, окружающее шар, и может измерить напряженность этого поля, пользуясь простыми измерительными приборами. Представим себе теперь другого наблюдателя (Бориса), пролетающего на ракете мимо первого. С точки зрения Бориса заряженный металлический шар движется относительно ракеты. Электрический ток, текущий по проводам в нашей квартире,– это движение электрических зарядов. Поэтому Борис будет наблюдать электрический ток. Но вспомним эксперимент Эрстеда: электрический ток вызывает появление магнитного поля. Поэтому приборы на ракете Бориса отметят присутствие как электрического, так и магнитного поля. Андрей будет наблюдать только электрическое поле, а Борис – и электрическое, и магнитное. К тому же напряжен-

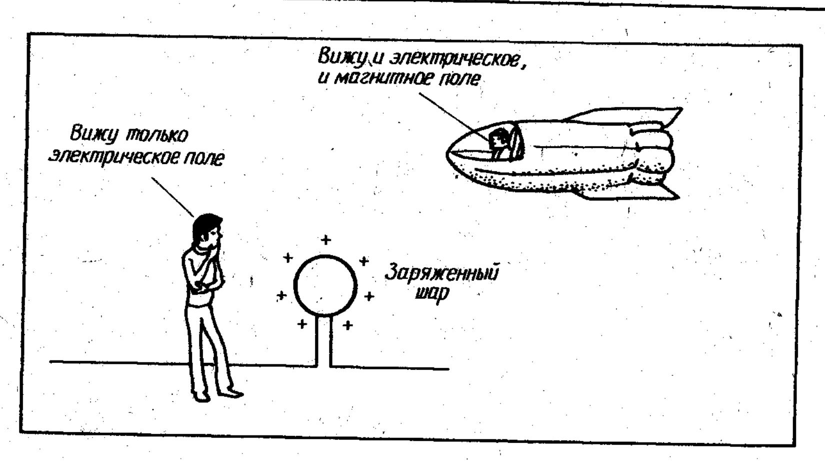


РИС. 3.1.
Наблюдатели и электродинамика. Одно и то же явление, связанное с электрическими и магнитными полями, выглядит по-разному для неподвижного и движущегося наблюдателей.

ность электрического поля в измерениях Бориса и Андрея будет разной. Итак, результаты экспериментов Андрея и Бориса как будто противоречат друг другу.

К счастью, Андрей и Борис знакомы с классической статьей Эйнштейна, название которой приведено выше. Им известно, что напряженности электрического и магнитного полей в трехмерном пространстве (измерения вверх-вниз, влево-вправо, вперед-назад) можно объединить в одну математическую величину, называемую *тензором напряженности электромагнитного поля.* Эта новая величина определена в четырехмерном пространстве-времени (измерения вверх и вниз, налево и направо, вперед и назад, в будущее и в прошлое). Знают они и о том, что электрические заряды и токи объединяются при этом в одну четырехмерную величину, называемую *4-током* (четыре-током). В результате четыре уравнения Максвелла (рис. 2.3) сводятся всего лишь к двум ковариантным уравнениям (рис. 3.2). Они содержат всю информацию, заключающуюся в уравнениях Максвелла, и к тому же теперь все наблюдатели единодушны в том, что эти уравнения правильно описывают действительность. Больше не остается никаких источников для разногласий между разными наблюдателями, как бы они ни двигались. Отдельные составляющие тензора напряженности соответствуют напряженностям электрического и магнитного полей в различных направлениях. Отдельные составляющие 4-тока соответствуют электрическим

$$\frac{\partial f_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} = \mu_0 J_\mu$$

$$\frac{\partial f_{\nu\sigma}}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial f_{\sigma\alpha}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial f_{\alpha\nu}}{\partial x_\sigma} = 0$$

РИС. 3.2.
Ковариантная запись уравнений электродинамики. Теория электромагнетизма может быть сформулирована в пространстве-времени таким образом, что уравнения будут иметь одинаковый вид во всех системах отсчета. Тогда четыре уравнения Максвелла сводятся всего к двум ковариантным уравнениям.

зарядам и обычному току, текущему в различных направлениях. Для каждого наблюдателя конкретные численные значения этих составляющих будут своими, но общая картина, если ее выразить с помощью принципа ковариантности, не вызовет разногласий.

На примере Бориса и Андрея видно, что если задача рассматривается в четырехмерной системе координат, то все трудности устраняются и споры разрешаются. Чтобы яснее почувствовать мощь эйнштейновского подхода, обратимся к пространству и времени. Как мы уже знаем из гл. 2, различные наблюдатели, движущиеся относительно друг друга, никогда не смогут прийти к согласию относительно измеренных расстояний и времени. Часы замедляют ход, а линейки укорачиваются по мере приближения скорости к световой. Для разных наблюдателей расстояние между двумя объектами различно, не совпадает и промежуток времени между двумя событиями. А могут ли два наблюдателя, находящиеся в относительном движении, хоть в чем-нибудь прийти к согласию?

Точно так же как в опыте Бориса и Андрея, результаты измерений длины и времени можно объединить, получив интервал пространства-времени между двумя событиями. Три слагаемых, входящие в этот интервал, определяются по измерениям расстояний (вверх-вниз, влево-вправо, вперед-назад) между точками, в которых произошли эти два события. Четвертое слагаемое – это промежуток времени между моментами, когда произошли события. Движущиеся относительно друг друга наблюдатели будут получать разные результаты, измеряя эти расстояния и промежутки времени, но придут к одному и тому же значению для полного интервала в четырехмерном пространстве-времени. Поэтому говорят, что *интервал инвариантен,* т. е. он одинаков для всех, что схематически представлено на рис. 3.3. Для одного наблюдателя два события могут быть очень близки

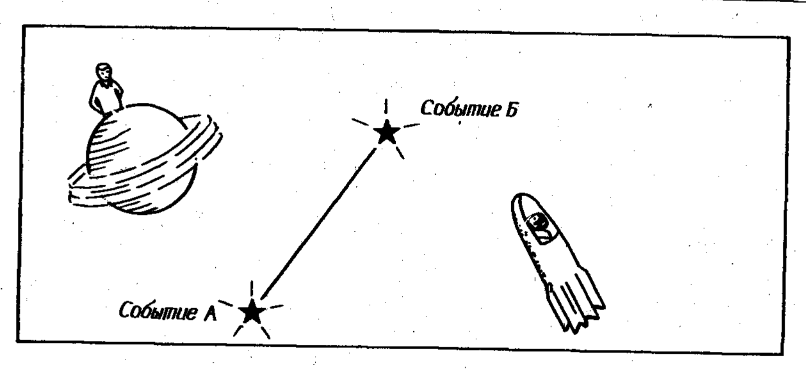


РИС. 3.3.
Инвариантный интервал. Наблюдатели, движущиеся относительно друг друга, не могут прийти к согласию относительно измерения расстояний и промежутков времени между двумя событиями. Однако каждый наблюдатель может объединить измеренные им расстояния и отрезки времени в *интервал* между этими двумя событиями в пространстве-времени, который будет одинаковым для всех наблюдателей.

по времени (т.е. происходить почти одновременно), но разделены огромным расстоянием в пространстве. Для другого наблюдателя те же самые события могут происходить с большим разрывом во времени (скажем, одно через много часов после другого), но очень близко друг к другу в пространстве. И тем не менее для обоих наблюдателей полный интервал пространства-времени между этими двумя событиями будет одинаков. Сокращение длин линеек и замедление хода часов двух наблюдателей, предсказываемые преобразованием Лоренца, как раз таковы, что интервал сохраняет инвариантность.

Итак, интервал между событиями в пространстве-времени инвариантен, преобразования Лоренца связывают между собой конкретные результаты измерений длин и промежутков времени, произведенных разными наблюдателями. Чтобы нагляднее продемонстрировать следствия преобразований Лоренца, рассмотрим их влияние на пространство-время. Понятие пространства-времени было введено в предыдущей главе, а из анализа эффекта замедления течения времени мы поняли, почему запрещены светоподобные и пространственноподобные траектории материальных частиц. Как обычно, на диаграммах пространства-времени мы будем использовать такие масштабы по осям, чтобы траектория световых лучей изображалась линиями с наклоном 45°. Если, например, отрезок длиной 1 см по оси времени соответствует 1 с, то отрезок в 1 см по пространственной оси соответствует 300 000 км. Для простоты будем обозначать про-

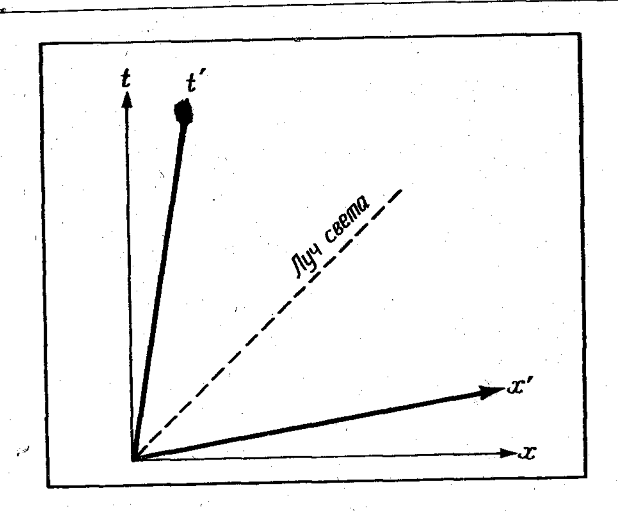


РИС. 3.4.
Преобразование Лоренца. В результате преобразования Лоренца пространственная и временная оси пространства-времени движущегося наблюдателя приближаются к мировой линии светового луча.

странство-время покоящегося наблюдателя (такого, как мы на Земле) как систему x, t, а пространство-время движущегося наблюдателя как систему x', t'. Если изобразить обе такие системы на одном чертеже, то мы увидим, к чему приводят преобразования Лоренца. Из рис. 3.4 следует, что система x, t выглядит как обычная диаграмма пространства-времени. Но если на этот чертеж нанести систему x', t' (для удобства точечное событие, соответствующее данной точке пространства и данному моменту времени, в обеих системах одно и то же), то ее оси отклонятся от осей системы x, t в направлении линии светового луча, идущей под углом 45°. Такое отклонение будет симметричным относительно линии светового луча, лишь если диаграмму рисовать в масштабах, при которых светоподобные линии наклонены под углом 45°. Кроме того, отклонение усиливается при увеличении скорости движения системы x', t' относительно системы x, t. Чем больше эта скорость, тем ближе к светоподобной линии с наклоном 45° оказываются оси x' и t'. Чтобы определить положение некоторого события в пространстве и времени в любой из двух систем отсчета, нужно провести из точки, обозначающей событие, прямые, параллельные соответствующим осям (рис. 3.5).

Такое наглядное представление преобразований Лоренца показывает, что термин «одновременность» не имеет смысла. Рассмотрим, например, два события, A и B, которые являются одно-

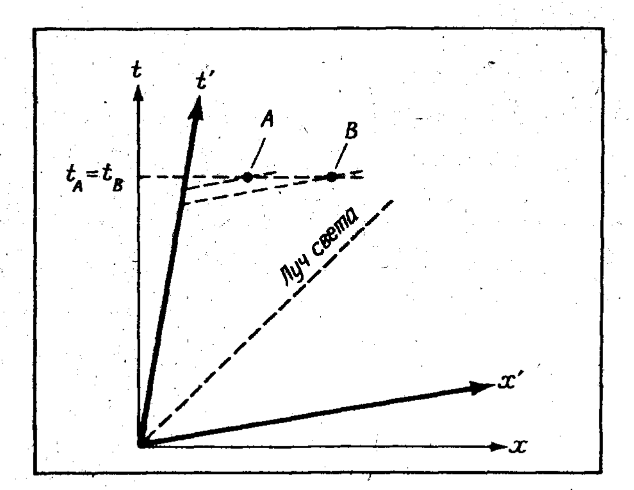


РИС. 3.5.
Понятие одновременности не имеет смысла. **Два события, происходящие одновременно с точки зрения одного наблюдателя, могут относиться к весьма различным моментам времени с точки зрения другого.**

временными в системе x, t. По определению это означает, что они оба произошли в один и тот же момент времени, т.е., как показано на рис. 3.5, $t_A = t_B$. Однако если рассматривать эти же два события в системе x', t' (движущейся относительно системы x, t), то они уже не будут одновременными. При этом всегда оказывается, что раньше произошло более удаленное событие.

Хотя движение быстрее света невозможно и хотя скорость света – абсолютная постоянная, при движении относительно источников света наблюдаются необычные явления. Чтобы разобраться в некоторых из них, представьте себе, что вы стоите под дождем, держа над головой раскрытый зонт. Представьте далее, что ветра нет, так что дождевые капли падают вертикально вниз. Если вы пойдете по улице, то вам, очевидно, придется наклонить зонт под некоторым углом в направлении движения, чтобы не намокнуть, причем угол наклона нужно будет увеличить, если вы ускорите шаг (рис. 3.6).

Аналогичное явление происходит и со светом звезд. Земля движется по орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Хотя эта скорость составляет очень малую долю скорости света, астрономам приходится из-за движения Земли немного наклонять свои телескопы вперед в направлении этого движения, чтобы в трубу телескопа попал свет именно той звезды, которую они хотят наблюдать. Подобно тому как приходится наклонять

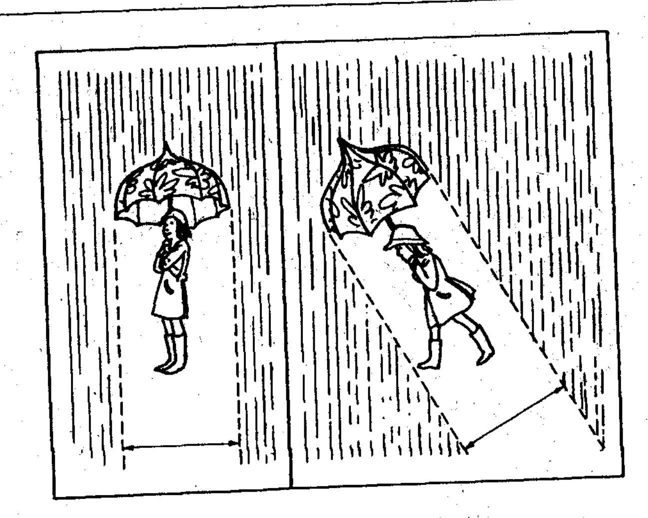


РИС. 3.6.
Прогулка под дождем. **Человек, идущий под дождем, должен держать зонт несколько впереди себя, чтобы не намокнуть. Чем быстрее идет человек, тем сильнее ему приходится наклонять зонтик, чтобы оставаться сухим.**

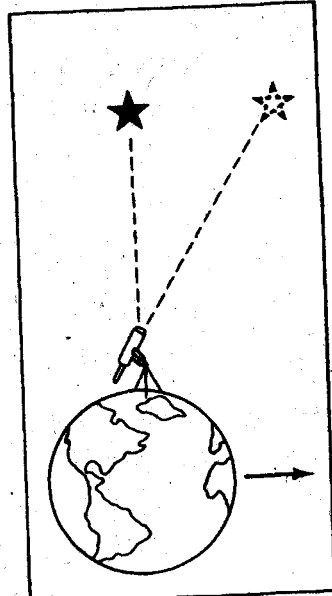


РИС. 3.7.
Аберрация света звезд. **Вследствие движения Земли телескоп приходится направить немного вперед от звезды по направлению движения Земли, чтобы свет звезды попал в трубу телескопа.**

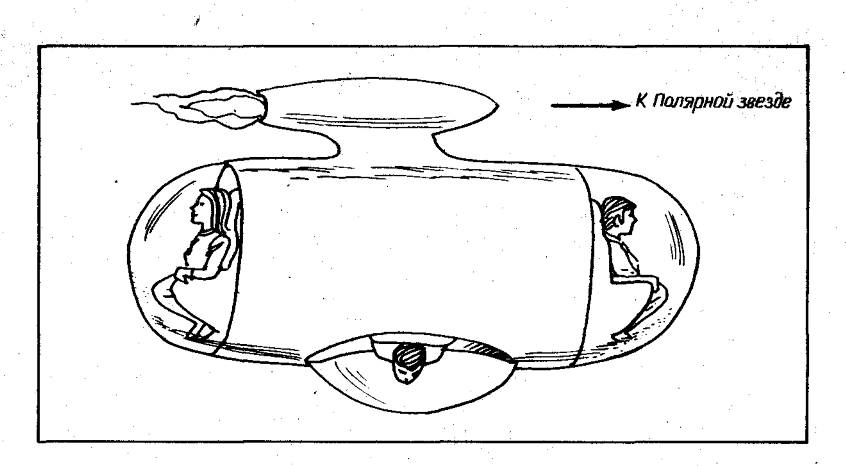


РИС. 3.8.

Релятивистский космический корабль. Этот космический корабль может развивать скорость, близкую к скорости света. У него три иллюминатора, в каждый из которых можно видеть полусферу неба. Космонавты могут наблюдать звезды, находящиеся спереди, сзади и сбоку перпендикулярно курсу корабля.

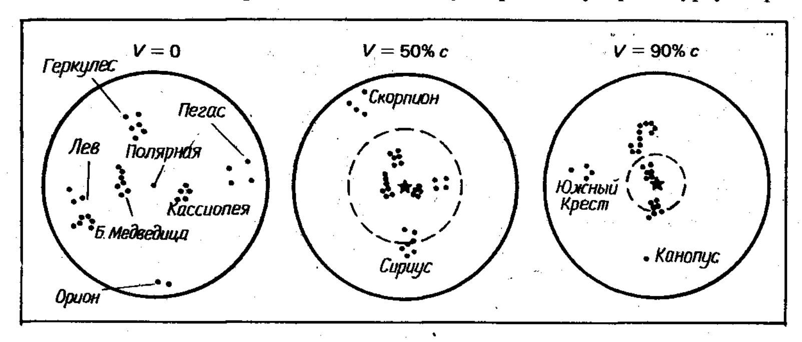


РИС. 3.9.

Вид из носового иллюминатора космического корабля. При путешествии к Полярной звезде (к Северному полюсу мира) звездное небо выглядит иначе, чем с Земли. По мере приближения к скорости света все звезды как бы скучиваются к Полярной звезде. (На основе расчетов Дж. Д. Скотта и Г. Дж. ван Дрила.)

зонт в направлении движения, приходится наклонять и телескоп на малый угол в направлении движения Земли (рис. 3.7). Этот эффект, называющийся *аберрацией* света звезд, был открыт Джеймсом Брадлеем около 1725 г., когда он обратил внимание на разность между наблюдаемыми и истинными положениями звезд.

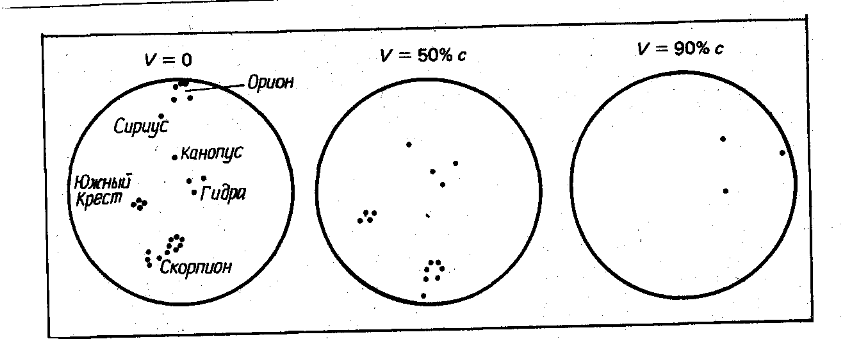


РИС. 3.10.

Вид из кормового иллюминатора космического корабля. Когда корабль летит к Полярной звезде и его скорость приближается к скорости света, космонавт замечает, что в кормовой иллюминатор видно очень мало звезд. (На основе расчетов Дж. Д. Скотта и Г. Дж. ван Дрила.)

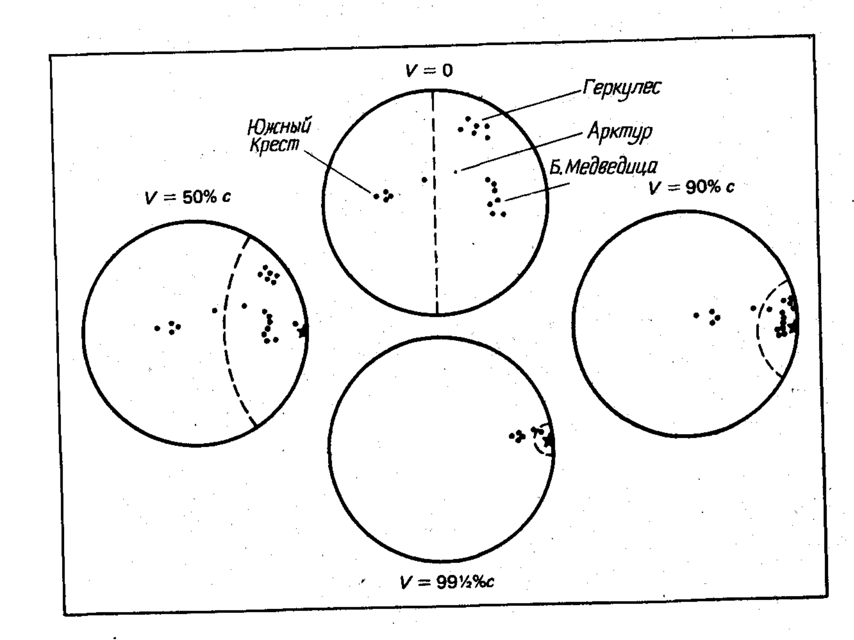


РИС. 3.11.

Вид из бокового иллюминатора космического корабля. По мере увеличения скорости все звезды неба скучиваются к Полярной звезде, в направлении которой летит корабль. (На основе расчетов Дж. Д. Скотта и Г. Дж. ван Дрила.)

Угол аберрации чрезвычайно мал и не превышает 20,5″. Для сравнения укажем, что видимый с Земли поперечник Юпитера составляет около 40″.

Аберрация света звезд так мала просто потому, что Земля движется очень медленно, со скоростью, составляющей всего одну десятитысячную скорости света. Если бы вы оказались на борту космического корабля, способного развить субсветовую скорость, то эффект аберрации стал бы очень заметным.

Представьте себе космический корабль, снабженный тремя большими иллюминаторами: одним носовым, одним кормовым и одним бортовым (рис. 3.8). Корабль этот может летать с колоссальной скоростью, а через каждый из его иллюминаторов видна ровно половина небесной сферы. Пусть ваш путь лежит в направлении Полярной звезды – в сторону Северного полюса мира. На рис. 3.9 изображено, что будет видно при этом в носовой иллюминатор. Пока корабль неподвижен ($V = 0$), вид созвездий будет таким же, как с Земли. Когда скорость корабля будет равна половине скорости света ($V = 0{,}5c$), вид неба уже существенно изменяется. Звезды как бы группируются вокруг Полярной звезды, и в поле зрения появляются даже некоторые из южных созвездий. При скорости, равной 90% скорости света, вид неба настолько сильно исказится, что *перед* космическим кораблем появится даже созвездие Южного Креста. Изображения звезд скучиваются в точности в том направлении, куда вы летите. В результате перед космическим кораблем начинает сверкать яркий звездообразный объект. А если бы вам удалось достичь скорости света, то все звезды и галактики оказались бы прямо по курсу космического корабля, и вы мчались бы к ослепительно яркому объекту, единственному на всем абсолютно черном небе.

На рис. 3.10 показан вид неба через кормовой иллюминатор космического корабля. При $V = 0$ картина не будет искажена. По мере приближения к скорости света будет видно все меньше и меньше звезд. Изображения звезд исчезают из поля зрения, перемещаясь по направлению к Полярной звезде. Конечно, звезды, исчезающие из поля зрения кормового иллюминатора, появляются в поле зрения носового иллюминатора.

Лучше всего наблюдать эту «миграцию» звезд в направлении движения космического корабля из его бортового иллюминатора (рис. 3.11). Обратите, в частности, внимание на то, как перемещается Южный Крест по полю зрения в направлении Полярной звезды по мере того, как корабль наращивает скорость в этом же направлении.

Хотя для того, чтобы построить звездные карты, показанные рис. 3.9–3.11, необходимы сложные вычисления, в их основе лежит повседневный опыт. Представьте себе, что вы едете по шоссе со скоростью 90 км/ч во время дождя. Если даже ветра нет и капли падают строго вертикально, ветровое стекло машины будет мокрым, а заднее стекло останется практически сухим. При этом пассажирам движущегося автомобиля кажется, что капли дождя налетают спереди. Точно так же при полете с субсветовой скоростью будет создаваться впечатление, что потоки звездного света падают на носовой иллюминатор космического корабля, как будто звезды со всего неба собрались перед кораблем. И если когда-нибудь космонавты покинут Солнечную систему со скоростью, очень близкой к скорости света, они тем не менее будут видеть Солнце в *носовой* иллюминатор космического корабля. А если они отправятся в межгалактический полет, то будут видеть перед собой нашу Галактику. Правда, при этом изображения Солнца и Галактики будут очень сильно искажены.

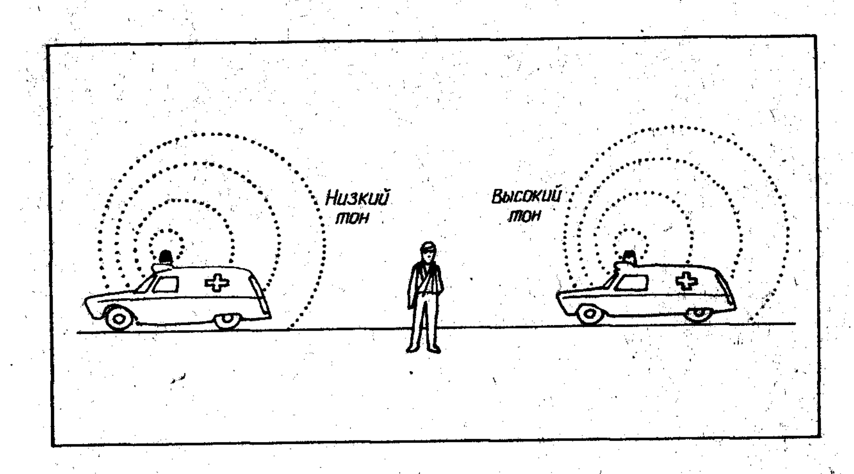


РИС. 3.12.
Эффект Доплера. Звук сирены приближающейся машины скорой помощи кажется все более высоким, так как звуковые волны от нее сгущаются. Напротив, звук становится намного ниже, когда автомобиль удаляется, потому что звуковые волны идут реже.

Но движение наблюдателя сказывается не только на положении звезд на небе, оно влияет также и на их цвет. Чтобы понять, почему это происходит, снова обратимся к повседневному опыту. Представьте себе, что вы стоите у края шоссе, а мимо проносится машина скорой помощи с включенной сиреной (рис. 3.12). Пока она приближается к вам, тон сирены кажется высоким, так как звуковые волны, испускаемые ею, «сгущаются» перед машиной. Но когда автомобиль начнет удаляться от вас, тон сирены значи-

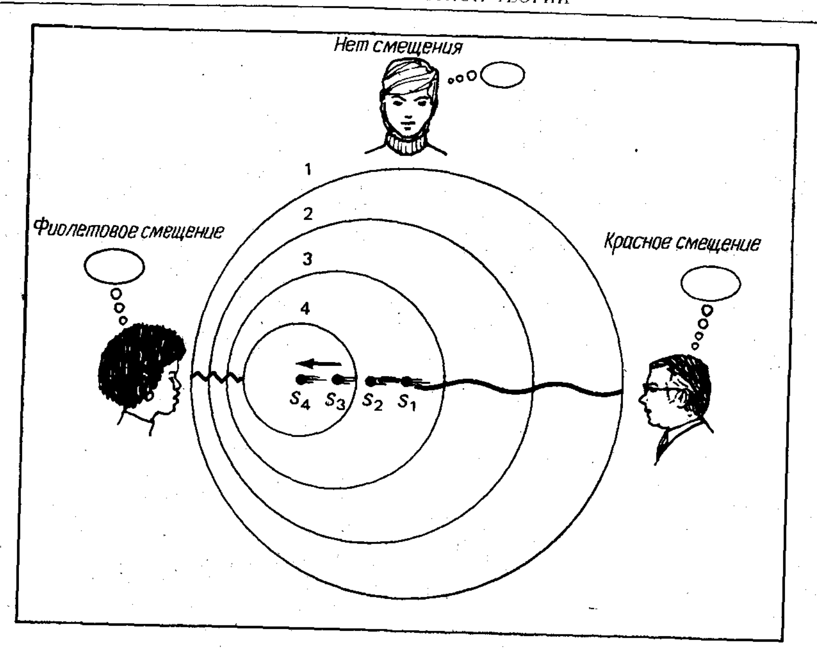


РИС. 3.13

Эффект Доплера. Свет от приближающегося источника испытывает фиолетовое смещение из-за сгущения световых волн, а от удаляющегося источника – красное смещение из-за их разрежения.

тельно понижается. Позади автомобиля звуковые волны идут реже (рис. 3.12). Это явление называется *эффектом Доплера.*

Эффект Доплера свойствен и свету. На рис. 3.13 показано, что световые волны приближающегося к вам источника света как бы нагоняют друг друга, поэтому кажется, что частота этого света выше (а длина волны короче), чем обычно. Из всех цветов радуги фиолетовый цвет обладает самой короткой длиной волны. Поэтому говорят о *фиолетовом* смещении света приближающегося к наблюдателю источника. Напротив, если источник света удаляется, то волны света идут реже, и частота света кажется ниже (а длина волны больше), чем обычно. Самой большой длиной волны из всех цветов радуги обладают красные фотоны, и поэтому говорят о *красном смещении* света удаляющегося от наблюдателя источника.

Точное значение сдвига длины волны находится в прямой зависимости от относительной скорости источника и наблюдателя. Когда скорость мала, сдвиг незначителен, но если скорость очень

велика, то сдвиг может быть чрезвычайно большим. Представьте себе, например, что вы приближаетесь к обычной электрической лампочке со скоростью, равной 99,99% скорости света. При такой колоссальной скорости сдвиг в сторону коротких волн настолько велик, что от лампочки к вам будут приходить рентгеновские лучи. Если же удаляться от обычной лампочки со скоростью, равной 99,99% скорости света, то к вам придут лишь радиоволны. В обоих случаях, хотя лампочка излучает видимый свет, ее нельзя увидеть простым глазом.

Важно осознать, что, хотя длина волны или цвет приходящего от источника света зависят от относительной скорости источника и наблюдателя, сама скорость света всегда остается одной и той же. Если измерять скорость света, приходящего от приближающегося или удаляющегося источника, результат будет всегда один и тот же: 300 000 км/с.

Если теперь вернуться к наблюдению неба в иллюминатор космического корабля, то нетрудно понять, что из-за эффекта Доплера цвет звезд будет сильно меняться. Свет звезд, наблюдаемых впереди корабля, будет испытывать фиолетовое смещение, так как они приближаются к наблюдателю. Напротив, свет звезд, видимых в кормовой иллюминатор, будет подвержен красному смещению, так как они удаляются от космического корабля. Но такая картина будет наблюдаться лишь при сравнительно малых скоростях полета. Если скорость космического корабля велика и составляет заметную долю скорости света, то начинает проявляться новый эффект.

Атомы, которые испускают видимый нами свет, подобны крошечным часам, а как мы уже знаем, движущиеся часы замедляют ход, причем замедление течения времени происходит независимо от направления движения. Отстают все часы: и приближающиеся и удаляющиеся. Значит, помимо эффекта Доплера частота света движущихся атомов будет понижаться (а длина волны увеличиваться) просто вследствие замедления течения времени. Иными словами, одновременно действуют два эффекта. Вдобавок к смещению, связанному с эффектом Доплера, замедление времени также вызывает некоторое красное смещение. Вклад замедления времени в сдвиг длины волн света меньше, чем вклад эффекта Доплера. Однако при субсветовых скоростях необходимо учитывать оба эффекта. На рис. 3.14 показано, в каких частях неба наблюдается красное, а в каких фиолетовое смещение при наблюдениях с космического корабля, летящего с субсветовой скоростью. По мере приближения к скорости света красное смещение, вызванное эффектом замедления течения времени, становится все заметнее. В результате область неба, в которой наблюдается фиолетовое смещение, непрерывно сокращается.

Любое обсуждение специальной теории относительности бы-

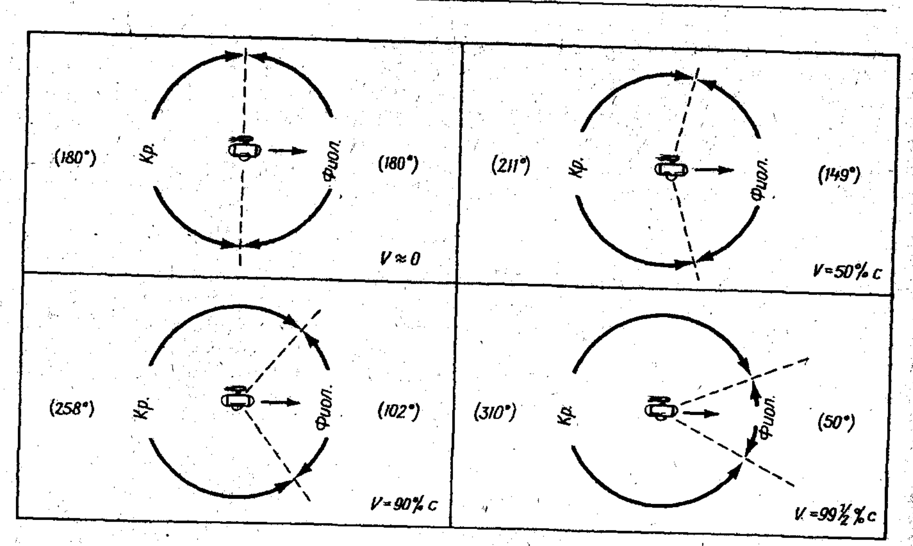


РИС. 3.14.

Красное и фиолетовое смещение. Одновременное действие эффекта Доплера и замедления течения времени приводит к заметному сдвигу длины волны света звезд, если проводить наблюдения с движущегося реактивного космического корабля.

ло бы неполным без упоминания о странных свойствах *тахионов*. Хотя обычное вещество нельзя разогнать до скорости, равной или превышающей скорость света, преобразования Лоренца формально математически допускают движение по пространственноподобным траекториям, если только вещество, совершающее такие путешествия, обладает некоторыми необычными свойствами. В обычном мире можно говорить о массе покоя, собственной длине и собственном времени в следующем смысле. Представьте себе, что вы держите кирпич. Масса покоя кирпича – это масса, которую вы измерите, когда находитесь в покое относительно кирпича. Собственные размеры кирпича – это те значения длин его ребер, которые вы измерите линейкой у покоящегося относительно вас кирпича. Если бы кирпич был радиоактивным, например был сделан из урана, то собственным периодом полураспада этого радиоактивного вещества был бы период полураспада, который вы измерили бы по вашим часам, покоящимся относительно кирпича. Эти «собственные» величины описывают свойства вещества в его, как говорят, *системе покоя*. Величины же, наблюдаемые в движущихся системах отсчета, будут связаны с собственными величинами в соответствии с преобразованиями Лоренца.

Поразмыслив о преобразованиях Лоренца, математик придет к заключению, что путешествия со сверхсветовыми скоростями могут совершаться, лишь если у движущегося вещества все собственные величины «мнимые». Для математика слово «мнимый» имеет вполне определенный смысл (пропорциональность корню квадратному из минус единицы), но в повседневной жизни ничто и никогда не описывается мнимыми числами. Однако гипотетическое вещество, способное двигаться быстрее света, должно обязательно характеризоваться мнимой массой покоя, мнимыми собственными размерами и мнимым собственным временем. Такое вещество состоит из *тахионов* (от греческого корня, означающего «быстрый»). Тахионы всегда движутся быстрее света в отличие от частиц обычного реального мира, называемых *тардионами*, которые всегда движутся медленнее света. Между тардионами и тахионами лежат *люксоны* – частицы, которые движутся со скоростью, равной скорости света (к ним относятся фотоны и нейтрино). Если тардионы, как правило, покоятся в реальном мире, а чтобы ускорить их до субсветовых скоростей, нужно затратить много энергии, то тахионы, напротив, обычно имеют бесконечно большую скорость, и требуется много энергии, чтобы замедлить их до скоростей, лишь незначительно превышающих световую.

Пожалуй, одно из самых серьезных возражений против существования тахионов – это нарушение причинности. Мы привыкли к вполне определенному соотношению между причиной и следствием в окружающем нас мире. Все события происходят по той или иной причине, и причина всегда предшествует следствию. Но для тахионов соблюдение принципа причинности вовсе не обязательно.

Чтобы проиллюстрировать проблемы, связанные с тахионами, рассмотрим простой эксперимент. Пусть тахион рождается в некоторой точке, пролетает некоторое расстояние и распадается. Предположим, к примеру, что у вас есть ружье, стреляющее тахионными пулями. Когда вы спускаете курок, из ружья вылетает тахион, пересекает комнату и попадает в стену. Назовем момент вылета тахиона из ружья событием *A*, а момент его попадания в стену – событием *B*. Поскольку тахион летит быстрее света, мировая линия тахионной пули в пространстве-времени будет пространственноподобной. На диаграмме пространства-времени, изображающей этот эксперимент, отрезок, соединяющий события *A* и *B*, должен быть наклонен к вертикали под углом, превышающим 45° (рис. 3.15).

Предположим теперь, что во время вашего эксперимента кто-то пролетает мимо вас с очень большой скоростью. Его заинтересовало ваше тахионное ружье, и он детально пронаблюдал ход опыта. Что же он увидел? Вспомним прежде всего, что преобразование Лоренца приводит к сближению пространственной

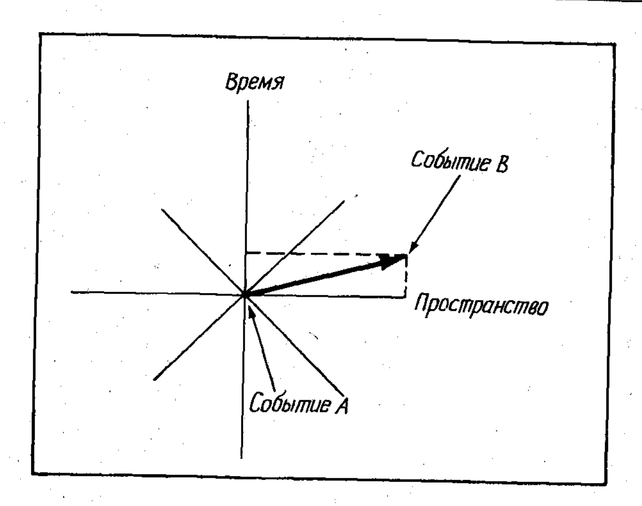


РИС. 3.15.

Тахион. Если тахионы существуют, то они движутся по пространственноподобным мировым линиям. На этой диаграмме изображен тахион, двигавшийся от события *A* (где он был выстрелен из тахионного ружья) к событию *B* (где он попал в стену).

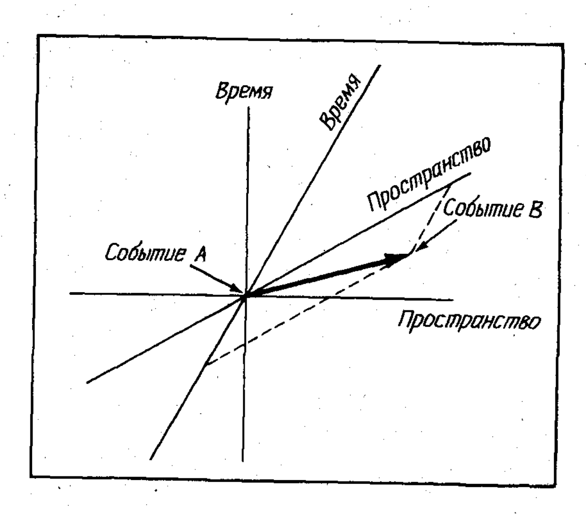


РИС. 3.16.

Тахионы нарушают причинность. На этой диаграмме изображена та же пространственноподобная траектория тахиона от события *A* к событию *B*, что и на рис. 3.15. *Для движущегося наблюдателя событие B* произошло раньше события *A*.

и временной осей движущегося наблюдателя. На рис. 3.16 сближающиеся оси движущегося наблюдателя показаны на диаграмме пространства-времени неподвижного наблюдателя. На рис. 3.16 изображен также пространственноподобный путь тахиона от события *A* (когда вы спустили курок) до события *B* (когда тахионная пуля врезалась в стену). Для удобства предположим, что вы спустили курок как раз в тот момент, когда движущийся наблюдатель пролетал мимо вас. Когда же, с точки зрения движущегося наблюдателя, тахион попадет в стену? Чтобы ответить на этот вопрос, проведем из события *B* линию, параллельную пространственной оси движущегося наблюдателя, до пересечения с его осью времени (рис. 3.16). Линия пересечет временную ось движущегося наблюдателя в точке, предшествующей событию *A*. Значит, для движущегося наблюдателя событие *B* произошло раньше события *A*. Тахионная пуля попала в стену до того, как ружье выстрелило!

За последнее десятилетие ученые неоднократно ставили эксперименты, чтобы найти тахионы. Либо тахионы слабо взаимодействуют с обычным веществом, либо они просто не существуют. Эти эксперименты обычно заключаются в поиске какого-то совершенно неожиданного явления для ядерной физики. Представим себе, например, такой дорожный инцидент: тяжело нагруженный грузовик на полной скорости врезается в стоящий «Запорожец». Ясно, что небольшой автомобиль при таком столкновении будет отброшен по шоссе в том направлении, в котором двигался до столкновения грузовик. Однако если бы в столкновении участвовали тахионы, то «Запорожец» мог быть отброшен и в противоположную сторону. В некоторых экспериментах легкие ядра обстреливаются тяжелыми ядрами. Если бы легкие ядра при этом отскакивали в сторону, противоположную первоначальному полету тяжелого ядра, то это свидетельствовало бы о присутствии тахионов. Но все эксперименты, предназначенные для обнаружения тахионов, закончились полной неудачей.

В начале 1974 г. два физика, Р. Клей и Ф. Кроуч, опубликовали данные, которые можно было бы назвать «косвенным свидетельством» существования тахионов. Они провели подробный анализ *широких атмосферных ливней*, возникающих при вторжении в верхние слои земной атмосферы космических лучей высоких энергий. Космические лучи – это атомные ядра и элементарные частицы высокой энергии (обычно протоны или электроны), приходящие из глубин космоса с субсветовыми скоростями. Когда эти частицы (или первичные космические лучи) сталкиваются с атомами в верхних слоях атмосферы Земли, в результате этих катастрофических столкновений возникают «ливни» ядерных частиц. Обычно атмосферные ливни возникают на высоте примерно 25 км и состоят из множества частиц, также

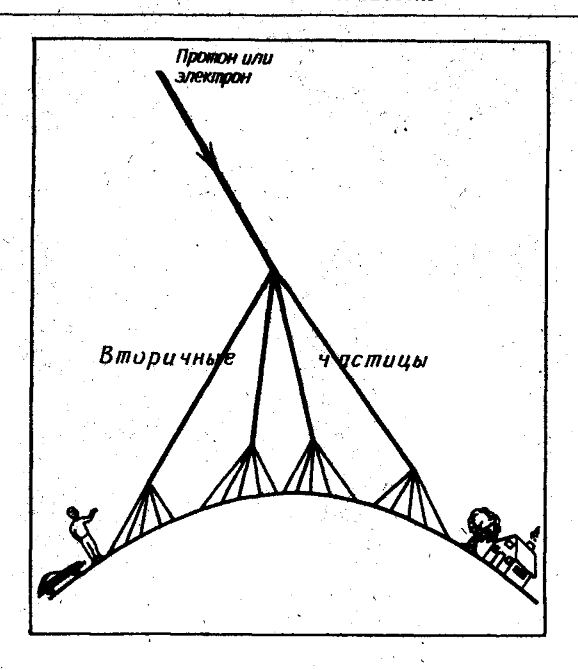


РИС. 3.17.

Широкий атмосферный ливень космических лучей. **Такой ливень порождается протоном или электроном высокой энергии при столкновении с атомом в верхних слоях земной атмосферы. Примерно через 6 стотысячных секунды все образовавшиеся при столкновении осколки «дождем» падают на Землю.**

движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Эти вторичные частицы сталкиваются с атомами в более низких слоях земной атмосферы, порождая в свою очередь огромное число новых частиц, падающих дождем на Землю (рис. 3.17).

Чтобы пройти расстояние 20 км, свету требуется примерно 6 стотысячных секунды. Поэтому обычные частицы (тардионы) широкого атмосферного ливня должны прийти на землю более чем через 6 стотысячных секунды после первого столкновения частицы первичных космических лучей с атомом в верхних слоях земной атмосферы. Клей и Кроуч обнаружили малые ливни, непосредственно предшествовавшие началу широкого атмосферного ливня (рис. 3.18). Это, по-видимому, указывает на присутствие в атмосферном ливне тахионов. Клей и Кроуч проанализировали данные о 1307 атмосферных ливнях, зарегистрированных с сентября по август 1973 г. Их анализ дал статистически значимое число частиц, пришедших менее чем за 6 стотысячных секунды до начала собственно широкого атмосферного ливня.

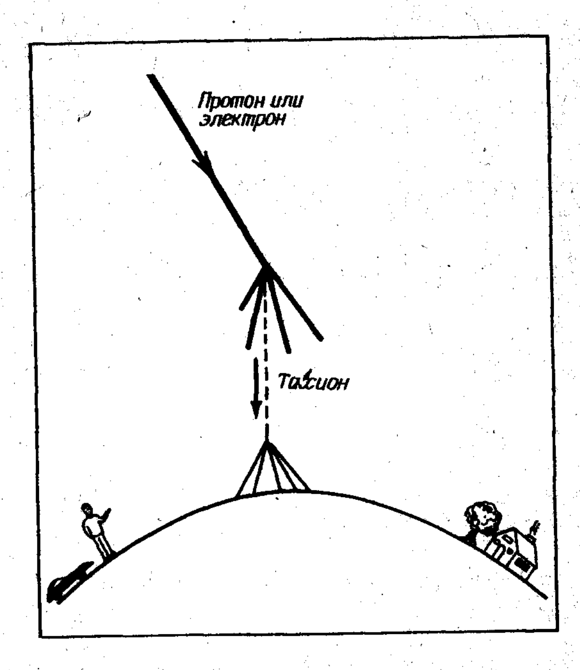


РИС. 3.18.

Порождаются ли тахионы космическими лучами? **Если бы при столкновении космических лучей с атомами в верхних слоях земной атмосферы рождались тахионы, то они достигали бы поверхности Земли раньше, чем все остальные частицы.**

Хотя работа Клея и Кроуча вовсе не доказывает, что тахионы существуют, их результаты, несомненно, представляют интерес. Будем надеяться, что дальнейшие наблюдения широких атмосферных ливней в конце 1970-х годов либо подтвердят, либо опровергнут существование «предвестников», приходящих менее чем за 6 стотысячных секунды до начала ливня. Если существование тахионов подтвердится, то это радикально повлияет на всю науку: причинность может нарушаться – следствие может предшествовать своей причине.

4

ГРАВИТАЦИЯ И ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Основная задача, с которой встретились древние астрономы,– это объяснение движения планет. Наблюдая их на протяжении тысячелетий, люди узнали, что планеты движутся лишь в узкой полосе двенадцати созвездий, опоясывающих небосвод и получивших название Зодиака. При этом каждая планета описывает на протяжении недель или месяцев сложный путь среди неподвижных звезд этих созвездий (рис. 4.1). Именно поэтому слово «планета» происходит от древнегреческого глагола, означающего «странствовать».

Стремление понять движение планет имело в древности глубокие причины. Планеты почитались как олицетворение богов, и понять их движения означало для людей постижение намерений богов, обитавших на небесах. Очевидно, те жрецы или астрологи, которые могли предсказать движение планет среди неподвижных звезд, обладали и богатыми знаниями, и властью.

Из всех систем мира, созданных в древности для объяснения движения планет, наибольшей известностью пользовалась система Птолемея, жившего в Александрии во II в. н. э. Система мира Птолемея была уточнением и усложнением более раннего труда Гиппарха, исходившего из двух основных предположений. Во-первых, древние были убеждены, что Земля находится в центре Вселенной. Если вы едете на лошади или в колеснице или просто прогуливаетесь, то факт вашего движения очевиден. Но так как почва под вашими ногами неподвижна, то вполне разумно предположить, что Земля покоится. Поэтому из еженощных наблюдений звездного неба древние заключили, что оно обращается вокруг нашей Земли, которая неподвижна и находится в центре Вселенной. Во-вторых, прямая и непосредственная связь небес с богами обеспечивает им совершенство. А поскольку небеса совершенны, то любая попытка объяснить движения небесных светил по необходимости должна исходить лишь из окружностей — наиболее совершенных фигур в геометрии. Поэтому система мира Птолемея – это геоцентрическая система, в которой все должно объясняться с помощью окружностей и круговых движений.

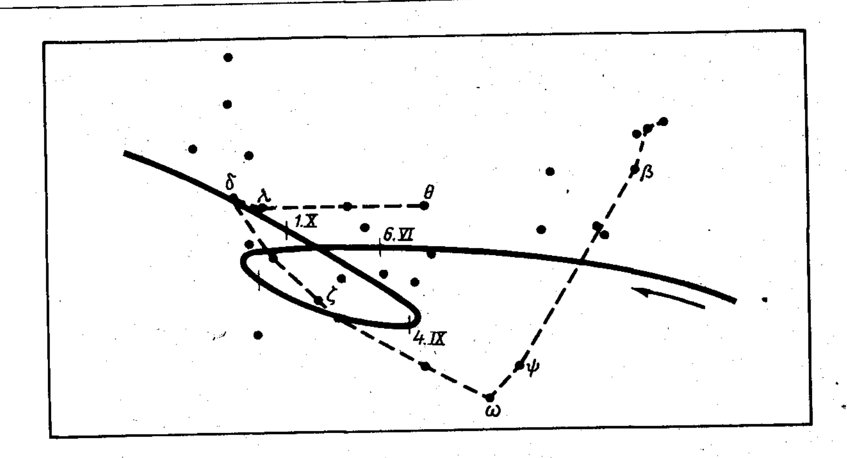


РИС. 4.1.
Видимый путь планеты Марс. На приведенной карте звездного неба показан видимый путь Марса в созвездии Козерога в 1971 г.

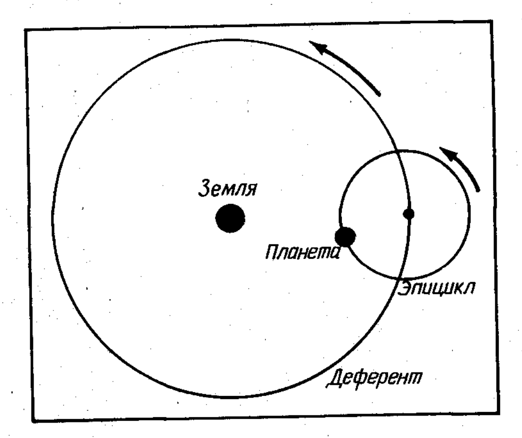


РИС. 4.2.
Система мира Птолемея. В геоцентрической системе Птолемея движение планет описывается с помощью системы окружностей. Считается, что планета движется по *эпициклу*, который в свою очередь следует по *деференту*, центр которого совпадает с Землей.

В Древней Греции господствовала точка зрения, что стра ствия планет среди созвездий Зодиака следует объяснять предпо ложением, что планеты обращаются по *эпициклам* – окружно тям, которые в свою очередь движутся по *деферентам*, цент которых приблизительно совпадает с Землей (рис. 4.2). Вкла Птолемея в эту систему состоял в ее разработке во всех подроб ностях. В его «Альмагесте», включающем 13 книг, содержитс все, что должен был знать древний астроном или астроло чтобы рассчитать положение Солнца, Луны и планет на кажду ночь.

Система мира Птолемея просуществовала более тысячи ле как истинная картина физической реальности. Столь долго н продержалась ни одна другая система взглядов в астрономи Однако, когда надежность и точность астрономических наблюде ний возросли, стало совершенно ясно, что для получения пра вильных результатов систему Птолемея необходимо изменит Но ее усовершенствование обычно сводилось к предположениям что по эпициклам движутся дополнительные эпициклы. В конц концов в системе стало так много разных круговых путей, по ко торым со всевозможными скоростями обращались планеты, чт геоцентрическая система мира оказалась под угрозой развалить

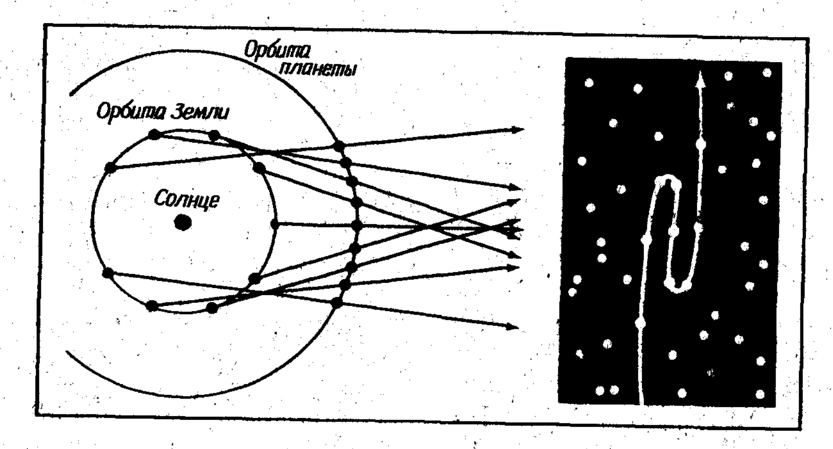


РИС. 4.3.

Гелиоцентрическая система мира. Видимое движение планет на небосводе мо жет быть без труда объяснено движением Земли вокруг Солнца. Как видно из рисунка, когда Земля обгоняет медленнее движущуюся внешнюю планету, то ка жется, что эта планета сначала останавливается в своем движении, а затем на некоторое время начинает смещаться вспять.

ся под тяжестью собственной сложности. Назрело время для радикальной перемены в нашем мышлении.

В III в. до н. э. Аристарх Самосский выдвинул гипотезу, что Вселенная окажется несравненно проще, если принять, что в ее центре находится Солнце, а Земля наравне с другими планетами обращается вокруг него. То, что такая система способна объяснить сложное движение планет, легко увидеть на рис. 4.3. Когда Земля обгоняет медленно движущуюся внешнюю планету, та как бы приостанавливает свое обычное (прямое) движение на восток и начинает попятное движение среди звезд, очерчивая петлю на небе. Хотя такая гелиоцентрическая картина мира позволяла упростить объяснение движения планет, она была отвергнута древними астрономами как лишенная основания, ибо требовала движения Земли вокруг Солнца.

В конце эпохи Возрождения благодаря труду Николая Коперника (рис. 4.4) произошло, наконец, подлинное возрождение гелиоцентрической системы мира. В отличие от Аристарха, который лишь высказал общую идею, Коперник кропотливо разработал все математические детали гелиоцентрической системы и показал, что ее действительно можно положить в основу точного предвычисления положений планет. К сожалению, Коперник в своей работе продолжал пользоваться круговыми орбитами, и в итоге для точного описания движений планет пришлось включить эпициклы. Однако если в наиболее полной формулировке системы Птолемея требовалось в общей сложности 79 окружностей, то гелиоцентрическая система Коперника для достижения такой же степени точности требовала лишь 34 окружности.

Несмотря на противодействие со стороны церкви, гелиоцентрическая гипотеза начала постепенно завоевывать признание. Она была подтверждена наблюдениями в Италии, где Галилео Галилей, пользуясь изобретенным им телескопом, открыл фазы Венеры и четыре самых больших спутника Юпитера. Его наблюдения показали, что вокруг других планет обращаются небесные тела, а не только вокруг Земли. В частности, единственным разумным объяснением существования фаз Венеры было признание того, что она обращается вокруг Солнца (рис. 4.5).

Тем временем в Северной Европе молодой талантливый астроном Иоганн Кеплер (рис. 4.6) пытался описать орбиты планет при помощи более сложных, чем окружности, кривых. Учитель Кеплера, Тихо Браге, накопил за два десятилетия исключительно точные наблюдения планет. Анализируя эти данные, Кеплер пришел к заключению, что любая система, опирающаяся на эпициклы, в корне порочна. Современная астрономия берет свое начало от гениального решения испробовать в качестве орбит разные кривые.



РИС. 4.4.
Николай Коперник (1473–1543).

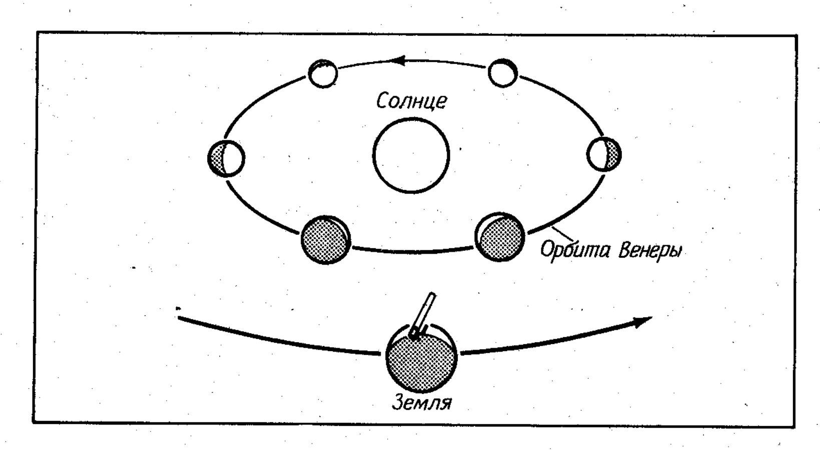


РИС. 4.5.
Фазы Венеры. **Галилей обнаружил, что у Венеры, как и у Луны, происходит смена фаз. Такой вид Венеры при взгляде в телескоп можно объяснить, если учесть, что она обращается вокруг Солнца, а не Земли.**

После многих проб и ошибок Кеплер пришел к выводу, что движение планет может быть очень точно описано в предположении, что их орбиты – *эллипсы*. Эту кривую легко нарисовать, если взять две кнопки, нитку и карандаш; остальное см. на

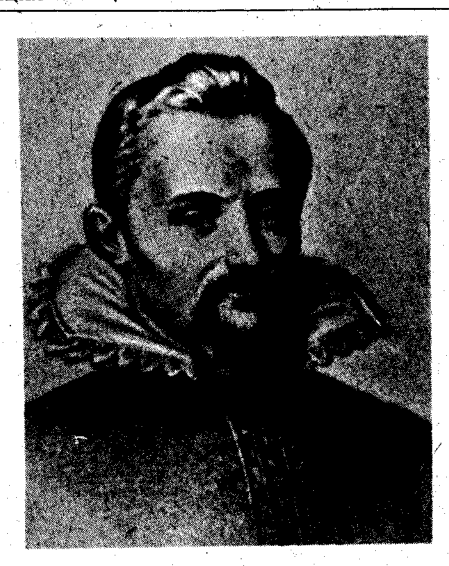


РИС. 4.6.
Иоганн Кеплер (1571–1630).

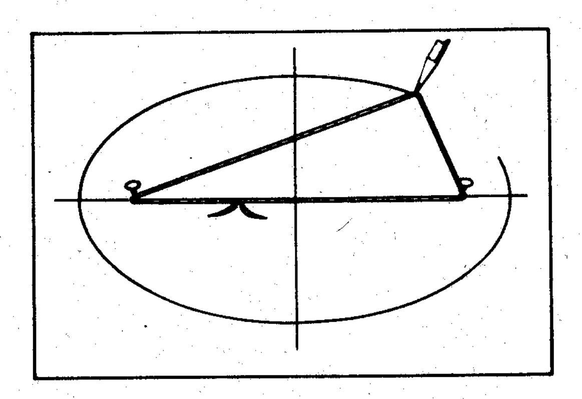


РИС. 4.7.
Эллипс. **Его можно вычертить, воспользовавшись двумя кнопками и петлей из нитки.**

рис. 4.7. Острия кнопок соответствуют фокусам эллипса. Фундаментальное открытие Кеплера, называемое теперь ***первым законом Кеплера***, состоит в утверждении, что любая планета движется вокруг Солнца по эллиптической орбите с Солнцем в одном



РИС. 4.8.
Исаак Ньютон (1643–1727)

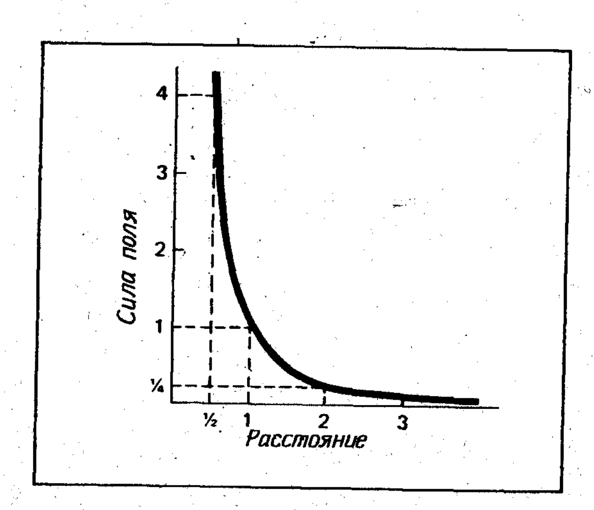


РИС. 4.9.
Закон тяготения Ньютона. На рисунке показано, как сила тяготения уменьшается при увеличении расстояния от порождающего ее тела. Удалившись на вдвое большее расстояние, вы обнаружите, что сила тяготения уменьшилась в четыре раза.

из фокусов. *Второй закон Кеплера* описывает скорость движения планеты по эллипсу, а *третий* задает связь между размерами этой эллиптической орбиты и периодом времени, за которое планета завершает полный оборот.

Законы Кеплера – это эмпирические законы. Он потратил много лет, проверяя разные предположения, пока, наконец, не нашел правильный результат. Совершенно иначе, чем Кеплер, действовал Исаак Ньютон (рис. 4.8), выбравший чисто теоретический подход к проблеме движения планет. В XVII в. Ньютон сформулировал три основных закона о природе движения. Согласно его первому закону, все тела сохраняют состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, если на них не действуют внешние силы. Однако планеты движутся не по прямолинейным траекториям. Следовательно, должна существовать сила, действующая на планеты и вынуждающая их двигаться по эллиптическим орбитам. Применив к законам Кеплера строгие математические методы, Ньютон установил, что эта сила всегда направлена в сторону Солнца; ему удалось также определить, как именно зависит эта сила от расстояния от Солнца до планеты, получившая название всемирного тяготения (гравитации), а Ньютоново описание того, как она действует, выражено в его *законе всемирного тяготения.*

Хотя закон тяготения Ньютона лучше всего выражается математически формулой, зависимость силы тяготения от расстояния можно изобразить и графически (рис. 4.9). Допустим, что вы находитесь на расстоянии 1 м от тела, притягивающего вас с силой 1 кг. При удвоении расстояния до источника тяготения сила гравитации станет вчетверо меньше. Соответственно на расстоянии 3 м сила тяготения будет равна лишь 1/9 кг. Приближаясь к источнику тяготения, вы заметите, что гравитация усиливается. На расстоянии 0,5 м эта сила учетверится, а на расстоянии 10 см гравитационная сила достигнет 100 кг.

Можно привести и другой наглядный пример поведения гравитации. Представьте себе человека весом 60 кг, стоящего на поверхности Земли (рис. 4.10). Округляя значение радиуса Земли, можно сказать, что человек находится на расстоянии 6500 км от центра источника тяготения. Пусть теперь он поднимется на вершину лестницы-стремянки высотой 6500 км. Он окажется тогда вдвое дальше от центра Земли и будет весить поэтому вчетверо меньше, чем прежде. Если поставить на верх стремянки обычные напольные весы, то он найдет, что его вес равен всего 15 кг.

Существенно, что точно такой же результат получится в том случае, когда радиус Земли возрастет вдвое. Если расстояние между всеми атомами, составляющими Землю, удвоится, то

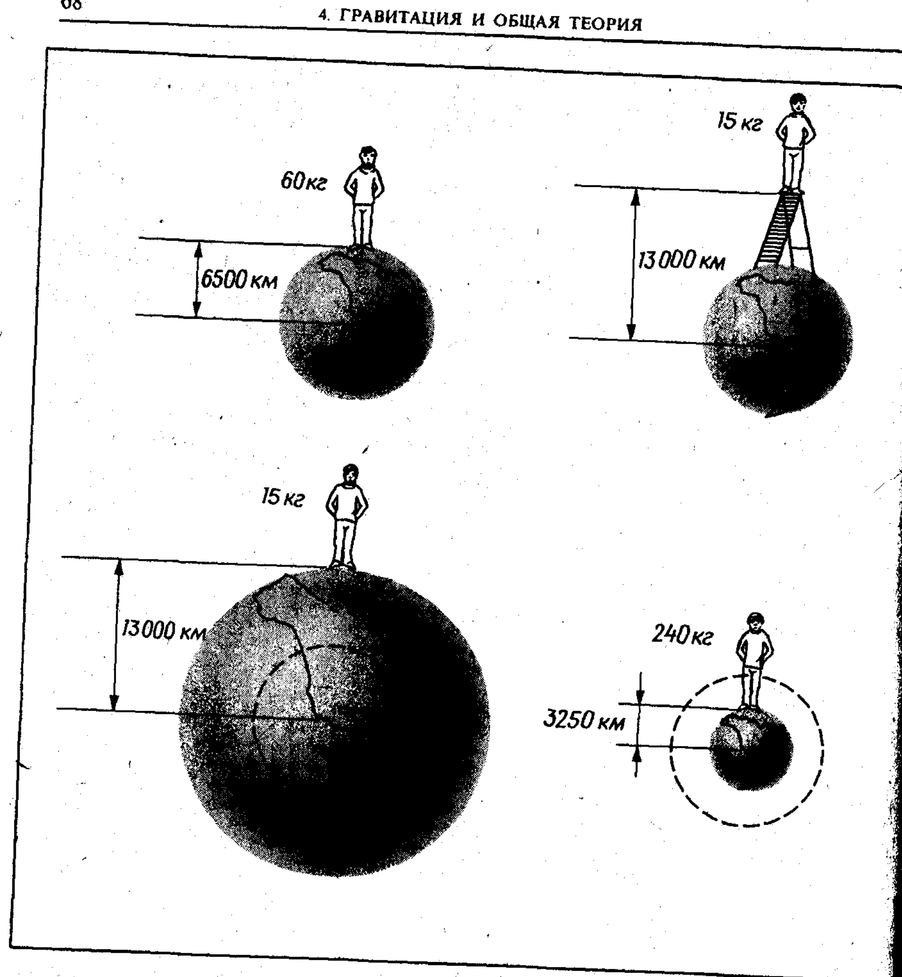


РИС. 4.10.

Закон тяготения. На этих четырех рисунках показано, как ведет себя сила тяготения. Вес человека зависит от его расстояния до центра Земли.

удвоится и поперечник нашей планеты. Число атомов Земли останется прежним, так что мы не добавим и не убавим ни одного грамма вещества. Мы всего-навсего иначе разместим вещество, из которого состоит Земля. Тогда наш приятель, весивший 60 кг, окажется на расстоянии 13 000 км от центра Земли и будет весить только 15 кг.

Поведение гравитации можно иллюстрировать и обратными примерами. Если сжать Землю вдвое по сравнению с ее исходны-

ми размерами, то наш приятель станет весить вчетверо больше, т.е. 240 кг. Сжав Землю до одной десятой ее прежних размеров, мы обнаружим, что стоящий на ее поверхности человек будет весить уже 6 т.

Отсюда ясно, что если бы можно было сжимать тела до очень малых размеров, то стало бы возможно создавать чрезвычайно сильные гравитационные поля. Если бы удалось заставить сжаться до ничтожно малых размеров звезду, Землю или просто песчинку, то сила тяжести на поверхности образовавшегося тела стала бы столь велика, что даже свет не мог бы ее покинуть. В 1795 г. французский математик Лаплас отметил это интересное свойство гравитации: что скорость убегания с очень сильно сжатого или очень массивного объекта может превысить скорость света. Но прошло целых 170 лет, пока астрономы поняли многие аспекты эволюции звезд, рассмотрели всерьез последствия рождения наблюдаемой нами Вселенной в чудовищном взрыве и начали исследовать свойства сверхсильных гравитационных полей.

Сформулировав закон тяготения, Ньютон обнаружил, что он теперь может не только чисто математически вывести и проверить законы Кеплера, но и сделать гораздо больше. Например, Ньютон доказал с помощью разработанных им математических методов, что орбиты тел, движущихся около Солнца, могут быть любой кривой из семейства *конических сечений*. Коническим сечением называется кривая, получающаяся при сечении конуса плоскостью (рис. 4.11). К коническим сечениям относятся окружности, эллипсы, параболы и гиперболы. По какой именно

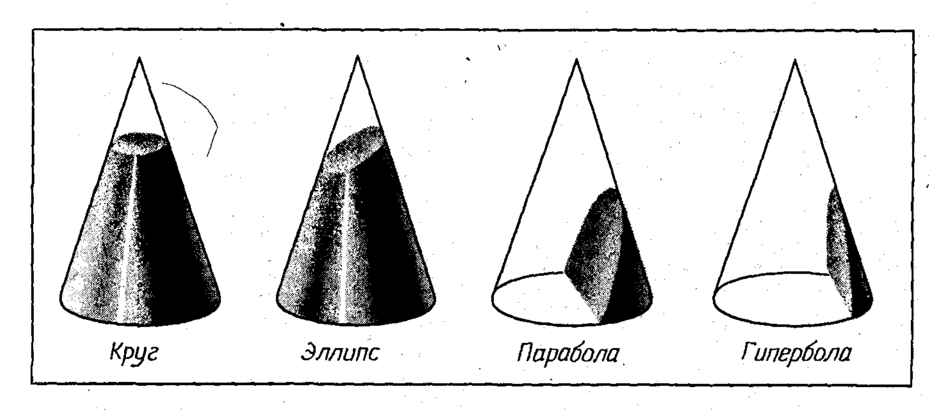


РИС. 4.11.

Конические сечения. Коническое сечение – кривая, которая получается, если конус рассечь плоскостью. В сечении будет эллипс, парабола или гипербола.

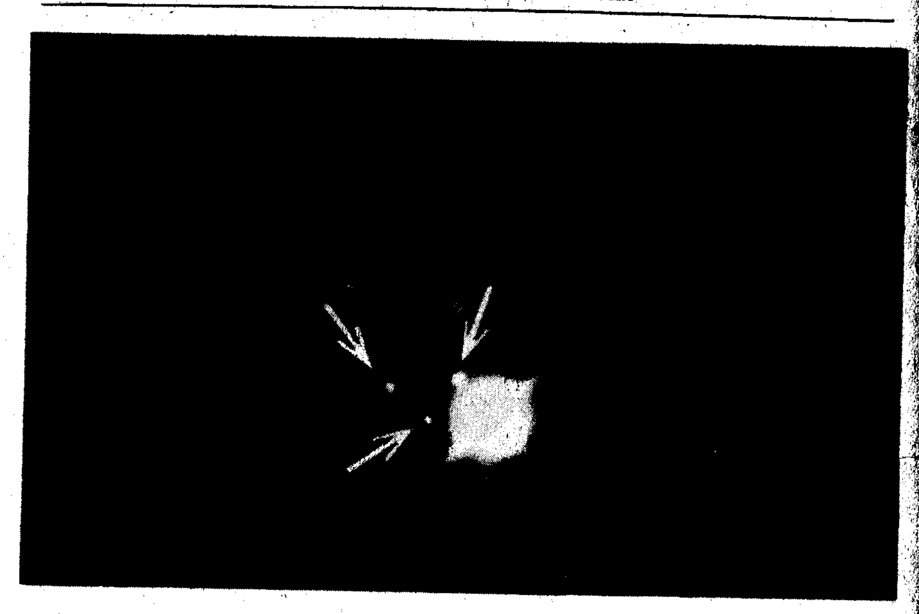


РИС. 4.12.
Уран и три его луны. Уран был случайно открыт в 1781 г. Спустя несколько десятилетий астрономы обнаружили, что он движется по небосводу иначе, чем этого требуют точные расчеты. (Ликская обсерватория.)

из этих орбит будет двигаться данное тело, определяется значением его скорости. При сравнительно малой скорости объект движется по замкнутой кривой – окружности или эллипсу. Но если скорость тела достаточно велика, его энергии хватит, чтобы покинуть Солнечную систему. Такой объект (скажем, комета) будет двигаться по параболической или гиперболической орбите.

В течение двухсот лет, прошедших после пионерских работ Ньютона, его закон тяготения получил множество убедительных и ярких подтверждений. Так, Вильям Гершель в 1781 г. совершенно случайно открыл в созвездии Близнецов планету Уран (рис. 4.12). После необходимых измерений ее положений на небе была рассчитана орбита Урана в соответствии с ньютоновским законом тяготения. Но к 1840 г. астрономы убедились, что Уран в своем движении по небосводу отклоняется от вычисленного пути. Быть может, на таком большом расстоянии от Солнца закон тяготения неверен? Едва ли! В Англии один студент-астроном произвел сложные вычисления и показал, что необычное поведение Урана можно полностью объяснить воздействием на него более далекой от Солнца, чем Уран, планеты. Такая дополни-

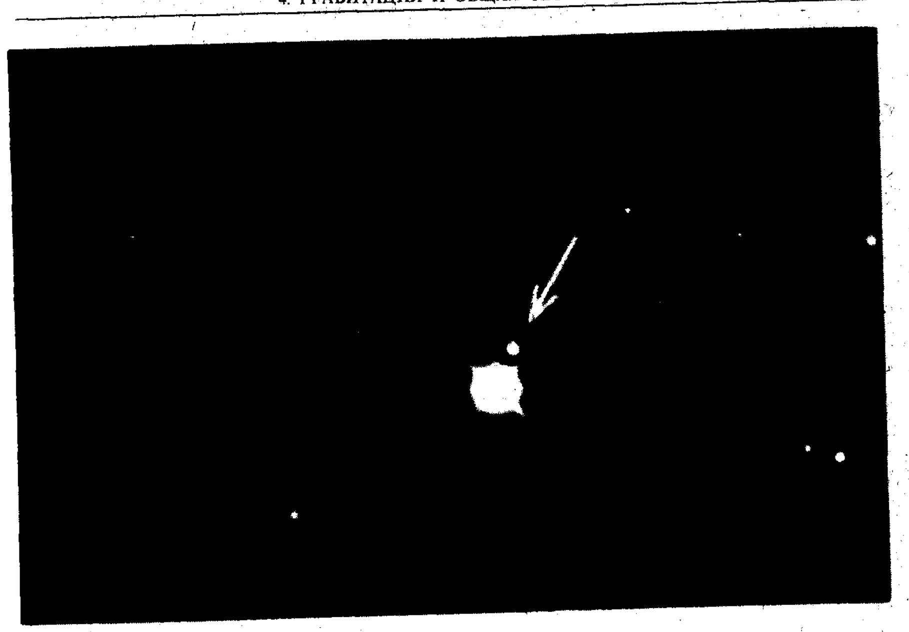


РИС. 4.13.
Нептун и самый крупный из его спутников. Астрономы предсказали существование Нептуна, чтобы объяснить аномалии движения Урана. Нептун был открыт поистине «на кончике пера». (Ликская обсерватория.)

тельная, хотя и незначительная сила слегка отклоняла движение Урана от теоретически высчитанного пути. К сожалению, на результаты вычислений этого юноши не обратили должного внимания – ведь он был только студентом. А вскоре независимо такие же вычисления проделал один французский астроном, который также предсказал и положение на небосводе этой еще не открытой планеты. Он написал об этом в одну немецкую обсерваторию. В день получения письма погода была ясная, и в ту же ночь человек впервые увидел восьмую планету Солнечной системы – Нептун (рис. 4.13). Закон всемирного тяготения Ньютона оказался столь точным и столь универсальным, что с его помощью удалось предсказать существование еще не известной ранее планеты! Нечего и говорить, какие бурные споры начались между английскими и французскими астрономами о том, кому принадлежит честь открытия...

Но несмотря на все успехи закона тяготения, к концу XIX в. стало очевидно, что с орбитой самой близкой к Солнцу планеты – Меркурия – не все в порядке. Теоретически, если учесть влияния на Меркурий притяжения всех остальных известных планет, то «в остатке» должен был бы получиться идеальный эллипс

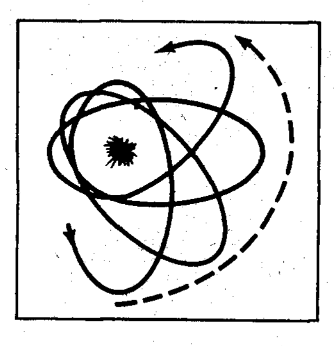


РИС. 4.14.
Орбита Меркурия. На рисунке показано, что орбита Меркурия очень медленно поворачивается вперед по ходу движения планеты. Это свойство не поддается объяснению с помощью законов Ньютона.

с Солнцем в одном из его фокусов. Однако на практике этот «остаток» приводил к ничем не объяснимому очень медленному повороту эллипса. По существу, орбита Меркурия имеет вид розетки, которая в сильно увеличенном виде изображена на рис. 4.14.

Учитывая историю с Ураном и Нептуном, некоторые астрономы выдвинули предположение о существовании неизвестной планеты между Солнцем и Меркурием – Вулкана и принялись за ее поиски, но безуспешно. Тогда другие астрономы предложили несколько видоизменить закон Ньютона, однако те поправки, которые нужно было ввести в закон для объяснения движения Меркурия, приводили к неверным результатам для внешних планет. Одним словом, классической физике Ньютона не удалось объяснить незначительную, но тревожную аномалию движения Меркурия. Пришла пора снова радикально перестроить наши представления.

Еще в гл. 1 мы говорили о том, что, смотря на звезды в ночном небе, мы в действительности заглядываем в прошлое. Это заставляет нас думать о времени как о четвертом измерении, существующем наряду с тремя обычными пространственными измерениями. Однако, наблюдая небо, мы обнаруживаем к тому же, что в астрономических масштабах тяготение – это самая главная сила природы. Оно удерживает Луну на ее орбите вокруг Земли; оно обеспечивает устойчивость Солнечной системы; и тяготение оказывается главной силой взаимодействия между звездами и галактиками, по-видимому определяя как прошлое, так и будущее Вселенной как целого. Как было бы замечательно, если бы эти два фундаментальных представления можно было бы как-то объединить и создать теорию, выражающую одно через другое. Тогда гравитация оказалась бы геометрией пространства-времени, а геометрия пространства-времени – гравитацией.

Начнем с того, что понятие гравитации как «силы» на самом

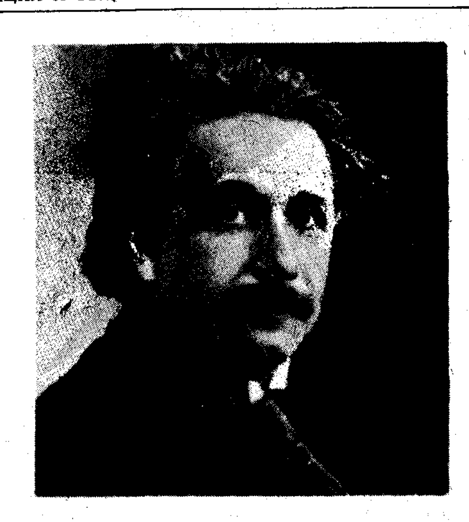


РИС. 4.15.
Альберт Эйнштейн (1879–1955).

деле относительно. Представьте себе, что вы стоите в комнате без окон. Вы ощущаете, что ваши ноги опираются в пол, на котором спокойно стоит мебель и другие предметы. Уронив яблоко, которое вы держали перед собой, вы увидете, что оно падает вертикально на пол с постоянным ускорением. Если бы эти явления наблюдал Исаак Ньютон, то он наверняка заключил бы, что комната находится на поверхности какой-то планеты, скажем Земли, и на все предметы в ней действует сила тяготения, вызывающая наблюдаемые явления. Именно тяготение удерживает вас и окружающую мебель на полу, и оно же ускоряет падающие предметы, скажем яблоко. На первый взгляд здесь невозможно усмотреть какие-либо противоречия, однако в начале XX в. Альберт Эйнштейн (рис. 4.15) предложил совершенно иную трактовку явлений в этой гипотетической комнате. Предположим, что комната находится в космосе на расстоянии в миллионы километров от любых источников сил тяготения, но вам это неизвестно. Теперь предположим, что под полом комнаты работают мощные реактивные двигатели с огромным запасом топлива, но вам это также неизвестно. Если эти двигатели работают все время, пока вы находитесь в этой комнате, и если они не порождают ни шума, ни вибраций, то во всем лишенном окон космическом корабле – вашей комнате – эти двигатели будут создавать ускорение, внушающее вам, будто вы покоитесь в каком-то поле тяготения. И эта иллюзия окажется настолько полной, что никакие эксперименты не помогут вам получить ответ, покоится ли ваша комната на поверхности планеты или находится в летящем по прямолинейной траектории космическом корабле (рис. 4.16).

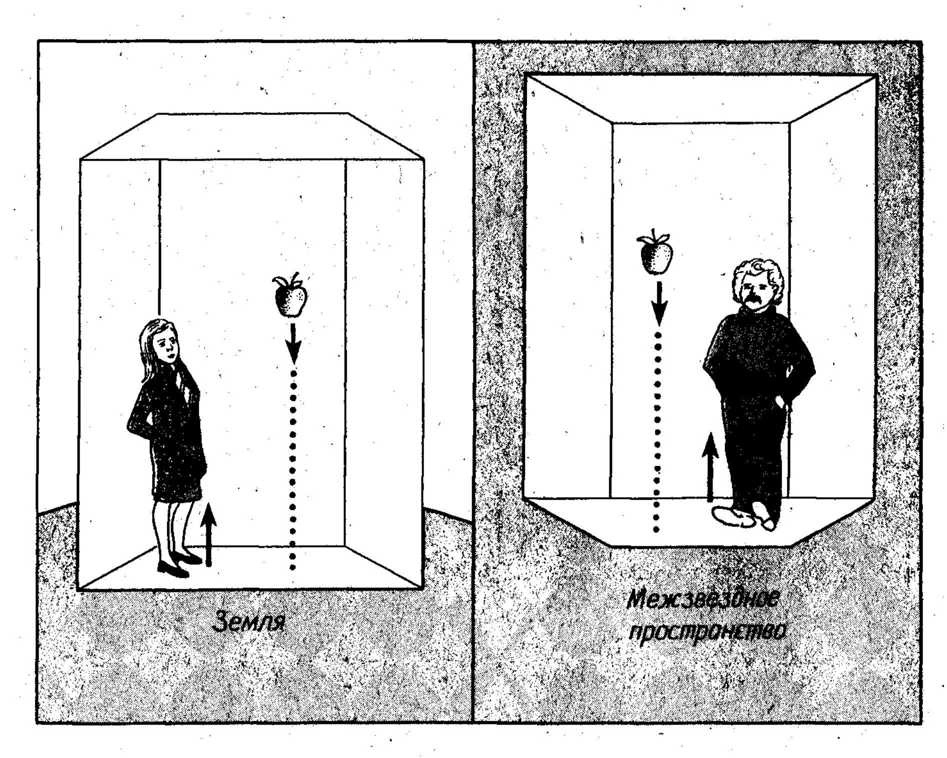


РИС. 4.16.
Принцип эквивалентности. С помощью опытов, проводимых в комнате без окон, невозможно выяснить, покоитесь ли вы в поле тяжести или подвергаетесь равномерному ускорению в далеком космосе. Оба случая полностью эквивалентны.

Эти примеры поясняют эйнштейновский принцип эквивалентности гравитации и ускорения. Согласно *принципу эквивалентности*, «локально», т.е. в малой области пространства, гравитацию и ускорение различить невозможно. На основании этого принципа полностью развенчивается представление о тяготении как о силе.

Широко распространено заблуждение (непонятно, откуда оно взялось?), будто специальная теория относительности неприменима к ускоренным системам отсчета. Совсем наоборот! Физики-ядерщики в своей повседневной работе со всей точностью используют частную теорию относительности для объяснения явлений, происходящих при фантастических ускорениях ядерных частиц высокой энергии. Поскольку специальная теория относительности – это один из лучших способов описания физической реальности, которым располагают ученые, то эту теорию можно

привлечь, чтобы понять поведение предметов в нашей гипотетической комнате без окон. В самом деле, оказывается возможным использовать частную теорию относительности для решения всех вопросов о гравитации в нашей комнате, поскольку мы можем принять, что тяготение – это локальное явление, вызванное ускорением. По существу, так можно анализировать любые гравитационные поля. В частности, поле тяготения вблизи такого тела, как Земля, можно изучить, разбивая все пространство на множество маленьких ячеек-комнаток. В каждой из них можно рассматривать ускорение, а не гравитацию и применять частную теорию относительности. Решив все интересующие нас вопросы для каждой из комнаток, мы объединим эти части в одно целое и получим общую картину. Выполняя подобное разбиение и последующее объединение, мы приходим к обобщению специальной теории относительности. В результате получается *общая теория относительности*.

Чтобы понять, как делается такое обобщение, рассмотрим в пространстве-времени мировую линию наблюдателя, претерпевающего кратковременное ускорение. Такая линия изображена на рис. 4.17. Мы без труда нарисуем сетку пространственно-временных координат нашего наблюдателя и после короткого периода ускорения. Если наблюдатель сначала покоится на диаграмме пространства-времени, то эта сетка будет совпадать с нашей собственной. Однако после периода ускорения наблюдатель движется по отношению к нам с некоторой скоростью. Согласно преобразованию Лоренца, обсужденному в предыдущей главе, пространственно-временная сетка движущегося наблюдателя будет казаться нам слегка скошенной, как это показано на рис. 4.17. Но там, где две сетки перекрываются, их согласовать будет невозможно.

Поскольку гравитацию можно рассматривать как эквивалент ускорения в удаленной от всех тел области космоса, мировую линию тела, падающего в поле тяготения, можно представить как бесконечно большое число очень слабо ускоренных движений, непрерывно следующих друг за другом. До и после каждого из таких периодов бесконечно малых ускорений можно строить пространственно-временные сетки. В результате окажется, что перед нами – бесконечное число областей с перекрытиями по всей диаграмме пространства-времени.

Причины этой трудности в том, что частная теория относительности ограничивается плоским пространством-временем. Области с перекрытиями возникают именно вследствие чересчур строгого применения понятия «плоское пространство-время в каждой точке и в каждый момент времени». Однако, если допустить, что пространство-время *искривлено*, эти трудности пропадут.

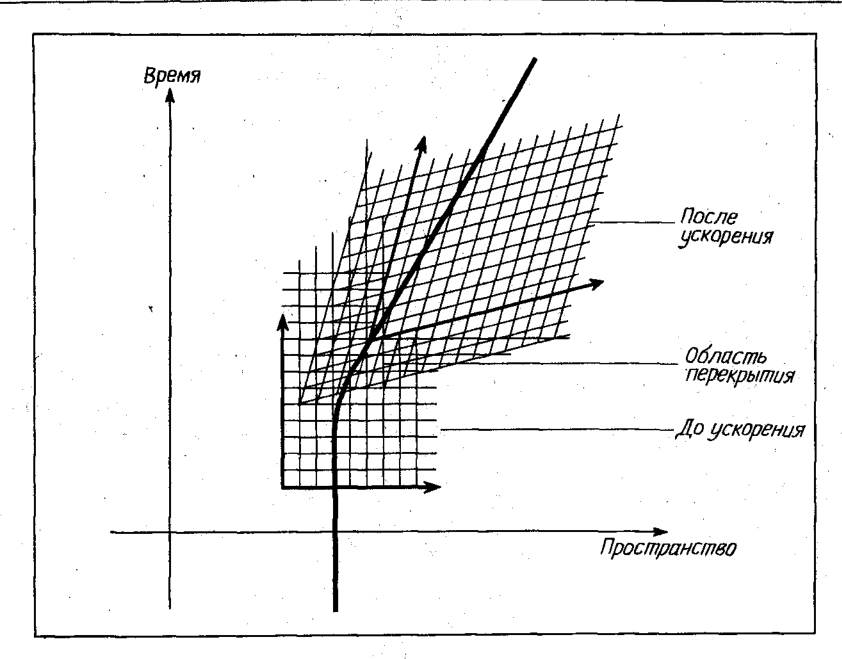


РИС. 4.17.
Недостаточность плоского пространства-времени для описания тяготения. При рассмотрении объектов, движущихся с ускорением, невозможно покрыть все пространство-время единой сеткой координат.

Но что такое искривленное пространство-время? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно сначала четко выяснить смысл терминов «плоский» и «искривленный». Для удобства, как это часто используется в теории относительности, ограничимся анализом двумерного случая. Если мы проведем анализ правильно, то его результаты можно будет распространить на все три измерения. Иными словами, если нам станет ясно, что понимается под утверждениями: «пол в комнате плоский», «поверхность баскетбольного мяча искривлена», то это послужит ключом к пониманию искривленного пространства-времени.

Представьте себе плоскую поверхность типа изображенной на рис. 4.18. Пусть из какой-то одной ее точки разбегается множество муравьев. Если каждый из них проползет *по наикратчайшей линии* одно и то же расстояние r от общей исходной точки и остановится, то в результате все муравьи расположатся на окружности с центром в исходной точке. Длина такой окружности равна $2\pi r$. Итак, полная длина кривой, вдоль которой разместятся в конце своего пути муравьи, будет равна $2\pi r$.

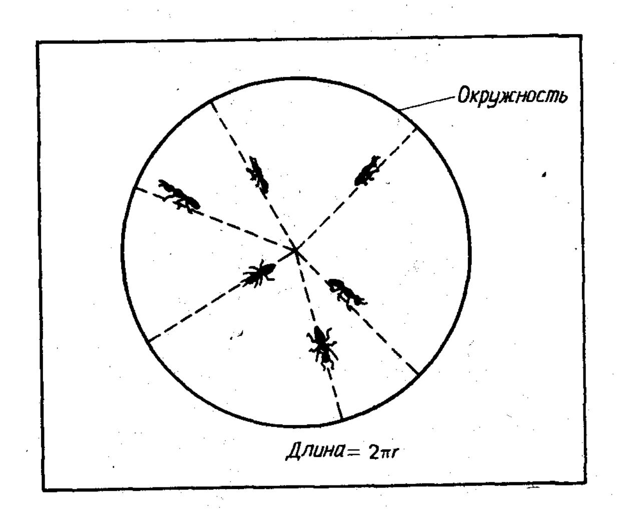


РИС. 4.18.
Муравьи на плоской поверхности. Каждый муравей проходит одно и то же расстояние r от одной и той же точки по кратчайшему возможному пути. Концы путей лежат на окружности, длина которой составляет $2\pi r$.

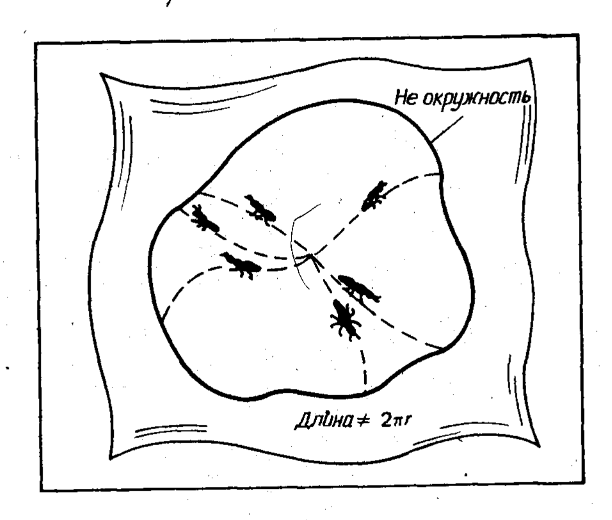


РИС. 4.19.
Муравьи на искривленной поверхности. Каждый муравей проходит одно и то же расстояние r от одной и той же точки по кратчайшему возможному пути. Концы путей лежат теперь на кривой, уже *не являющейся* окружностью.

Пусть теперь муравьи сделают то же самое на поверхности, не являющейся плоской (рис. 4.19). Как и прежде, каждый из них проползет от общей исходной точки одинаковое расстояние r по кратчайшему из возможных путей. Вообще говоря, в итоге муравьи уже не расположатся строго по окружности – огибающая их строй кривая будет выглядеть как деформированная окружность и полная длина получившейся замкнутой кривой уже не будет равна $2\pi r$.

Мерой кривизны пространства является отклонение полной длины «деформированной» окружности (т.е. длины замкнутой кривой, проходящей через всех муравьев к концу их путешествия) от величины $2\pi r$. Если длина этой кривой меньше $2\pi r$, то говорят, что кривизна поверхности *положительна*. Примером поверхности положительной кривизны является баскетбольный мяч. Если длина кривой больше $2\pi r$, то говорят, что кривизна поверхности *отрицательна*. И лишь если длина кривой в точности равна $2\pi r$, то соответствующая поверхность называется *плоской*: ее кривизна равна нулю. Примером поверхности отрицательной кривизны является поверхность седла.

Кривизна поверхности может меняться от точки к точке. Поверхность может быть в одной своей части плоской, а в других обладать положительной или отрицательной кривизной. Чтобы исследовать поверхности переменной кривизны, математики дрессируют свое муравьиное войско так, чтобы муравьи уходили от исходной точки лишь на очень малое расстояние. Тогда у математиков появляется возможность измерять кривизну поверхности в разных ее местах.

Этот способ определения кривизны можно распространить на пространства большего числа измерений. Чтобы понять, как это можно сделать, вспомните, что на двумерной поверхности (или в *2-пространстве*) муравьи разбежались во всех возможных направлениях от одной исходной точки *по данной поверхности*. В конце своего путешествия они выстроились по кривой, напоминающей окружность. В трехмерном пространстве (3-пространстве) муравьи вновь разбегаются от общей исходной точки во всех возможных направлениях в данном пространстве. В конце своего путешествия они выстроятся по замкнутой поверхности, напоминающей поверхность сферы. Кривизна 3-пространства определяется отклонением площади поверхности получившейся деформированной сферы от величины $4\pi r^2$ – площади поверхности сферы в плоском пространстве. Аналогично в четырехмерном пространстве (4-пространстве) муравьи разбегаются от общей исходной точки во всех возможных направлениях. В конце своего путешествия они выстроятся по «поверхности», которую можно назвать *гиперсферой*. Кривизна такого 4-пространства может быть найдена из сравнения величины трехмерной «поверхности»

гиперсферы с аналогичной величиной для случая плоского 4-пространства.

В XIX в. такие математики, как Бернгард Риман, Эльвин Бруно Кристоффель и Грегорио Риччи, разработали полную теорию искривленных пространств произвольного числа измерений. Результатом их трудов была новая область математики, именуемая *тензорным анализом*, который оперирует новыми математическими величинами – *тензорами*. Математическая величина $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$ – *тензор кривизны Римана* – содержит всю информацию об искривленном пространстве соответствующего (произвольного) числа измерений. Из тензора кривизны Римана можно построить другую математическую величину – *тензор Риччи* $R_{\alpha\beta}$, который сохраняет значительную часть той же информации. Именно это искал Эйнштейн!

Представление о тяготении как о силе можно преодолеть, воспользовавшись понятием локального ускорения. Трудность применения частной теории относительности к локально ускоренным ячейкам пространства – маленьким «комнаткам», взятым вместе, – можно преодолеть, если допустить, что пространство-время искривлено. Так мы подходим к удивительной гармонии – появляется мысль, что гравитационное поле любого тела нужно рассматривать как *искажение геометрии* пространства и времени. Эта идея – основа общей теории относительности.

В порыве вдохновения Эйнштейн понял, что гравитационное поле, окружающее объект, можно описать как кривизну пространства-времени, для которой тензор Риччи равен нулю. Уравнение $R_{\alpha\beta} = 0$ указывает, насколько пространство-время искривлено гравитационным полем тела. Это простое соотношение называют поэтому *уравнениями тяготения в пустом пространстве*. Решая эти уравнения, можно определить геометрию пространства-времени около Земли или около Солнца. Однако внутри Земли, как и внутри Солнца, пространство уже *не пустое*. Чтобы описать искривление пространства-времени в присутствии вещества, Эйнштейн вывел другую систему уравнений гравитационного поля. Из тензора Риччи можно непосредственно получить новую величину – *тензор Эйнштейна* $G_{\alpha\beta}$. В общем случае *уравнения Эйнштейна* для поля тяготения обычно записываются так: в левой части стоят математические величины (компоненты тензора Эйнштейна $G_{\alpha\beta}$), относящиеся только к геометрии пространства-времени, а в правой – математические величины (компоненты *тензора энергии-импульса натяжений* $T_{\alpha\beta}$), относящиеся только к физическим свойствам вещества (и полей), которые являются источниками гравитационного поля (рис. 4.20). Записав таким образом уравнения Эйнштейна, мы устанавливаем в сущности эквивалентность геометрии и распределения материи. Фундаментальным содержанием уравнений поля оказывается утвер-

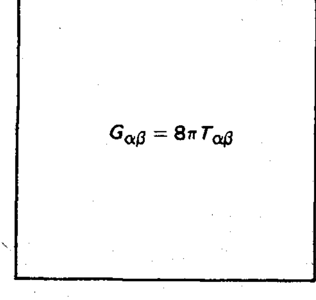


РИС. 4.20.
Уравнение гравитационного поля в общей теории относительности. Уравнения Эйнштейна выражают тяготение через геометрию пространства-времени. Материя указывает пространству-времени, насколько оно должно быть искривлено, а искривленное пространство-время указывает материи, как она должна себя в нем вести.

ждение: *геометрия пространства-времени указывает материи, какие свойства она должна иметь; одновременно материя указывает пространству-времени, как оно должно быть искривлено.*

Рассмотрим практическую задачу. Пусть, например, нам надо рассчитать, как движутся около Солнца планеты. Решая уравнения поля для пустого пространства выше поверхности Солнца, мы точно определим, как именно гравитационное поле Солнца искривляет пространство-время. Но что же делать дальше? Знать все о геометрии пространства и времени (какой она оказывается под влиянием вещества Солнца) – это еще не все. Ведь мы пока не знаем, по каким путям могли бы двигаться планеты.

Чтобы выйти из создавшегося положения, Эйнштейн сделал простое предположение: объекты движутся в искривленном пространстве-времени *по наикратчайшим путям*. Такие пути именуются *геодезическими* линиями. Геодезическая – это обобщение понятия прямой линии в плоском пространстве. Она описывается системой уравнений, называемых *уравнениями геодезической*. Представление о геодезических линиях оказалось весьма плодотворным. По геодезическим мировым линиям движутся свободно падающие тела и лучи света. Поэтому для того, чтобы решить задачу о движении планеты вокруг Солнца (или любую другую аналогичную задачу), нам достаточно проделать следующее:

1. Решить уравнения гравитационного поля. В результате мы найдем, как именно искривлено пространство-время.

2. Исходя из уже известной геометрии пространства-времени, решить уравнения геодезической. Результат покажет, как в данном искривленном пространстве-времени должны двигаться частицы или световые лучи.

На первый взгляд нет ничего более изящного и в то же время удивительного, чем движение частиц по геодезическим. Представим себе двух игроков в теннис. Пусть один из них, отбивая мяч,

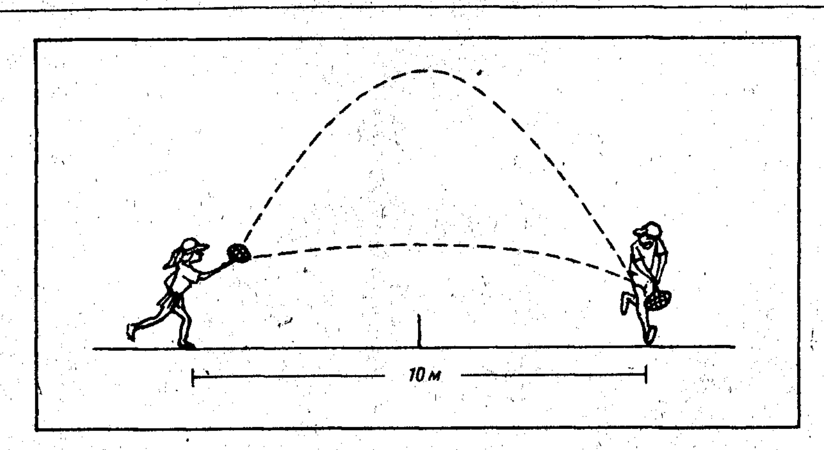


РИС. 4.21.
Игра в теннис (в пространстве). Траектории теннисного мяча выглядят очень различающимися в пространстве.

посланный партнером, направит его «свечой» высоко вверх. Мяч опишет над площадкой дугу восьмиметровой высоты, но в конце концов опустится к другому игроку на противоположном конце своего пути (рис. 4.21). Этот партнер вместо того, чтобы тоже послать мяч свечой, может отбить его прямым ударом на своего партнера, отстоящего от него на 10 м. Тогда мяч поднимется лишь на несколько сантиметров над серединой площадки, пролетев весь свой путь между игроками за очень короткий отрезок времени. Этот второй удар тоже показан на рис. 4.21. Что же произошло? В обоих случаях теннисный мяч пролетел между теми же самыми двумя точками. И в обоих случаях на протяжении всего своего полета мяч совершал свободное падение. Но взгляните на рис. 4.21! Как непохожи эти два пути! Как же мог Эйнштейн утверждать, что в обоих случаях мяч летел по геодезическим линиям?

В XIX в. Риман заинтересовался возможностью описывать тяготение посредством кривизны пространства. Однако, несмотря на все усилия, этот одаренный математик не добился успеха, так как учитывал только кривизну пространства. Но у Эйнштейна хватило проницательности физика для того, чтобы связать тяготение с геометрией посредством кривизны пространства-времени. Иными словами, «неувязка» в описанной теннисной игре произошла потому, что траектории мяча рассматривались только в пространстве, а не в пространстве-времени. Чтобы разобраться в пространственно-временном ходе игры в теннис,

нужно построить трехмерные пространственно-временные диаграммы. По одной оси мы будем откладывать положение мяча в горизонтальном направлении. Всего по горизонтали мяч пролетает в обоих случаях по 10 м. По другой оси мы будем откладывать высоту мяча над поверхностью площадки. Пущенный свечой мяч поднимается на высоту 8 м, тогда как прямой удар посылает его лишь на несколько сантиметров выше сетки. По третьей оси мы будем откладывать время, которое займут полеты теннисного мяча. Летя свечой, мяч затрачивает на путь между двумя игроками много времени, тогда как на полет при прямом ударе требуется гораздо более короткий промежуток. Получившийся график приведен на рис. 4.22.

Если внимательно разобрать оба случая, то окажется, что в пространстве-времени эти мировые линии по сути дела одинаковы. Обе они близки к дугам окружностей, каждая из которых имеет диаметр около двух световых лет. Хотя траектории теннисного мяча выглядят очень неодинаково в пространстве, эти пути в пространстве-времени выглядят одинаково. Конечно, прямой удар приводит мяч к цели быстрее, чем полет свечой. Поэтому мировая линия прямого полета и в пространстве-времени короче, чем мировая линия свечи. Однако обе они – дуги одной и той же окружности. Это одна и та же геодезическая.

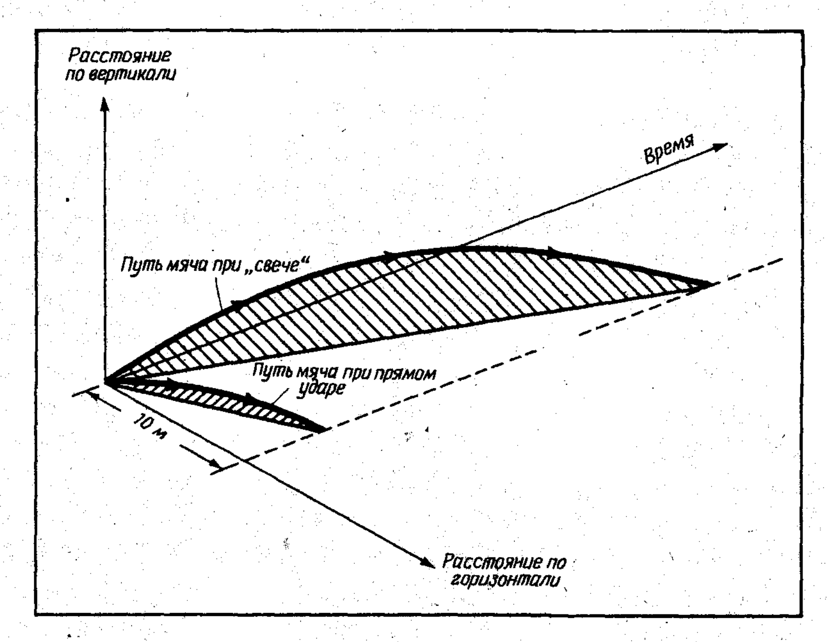


РИС. 4.22.
Игра в теннис (в пространстве-времени). Если рассматривать мировые линии теннисного мяча в пространстве-времени, то они кажутся одинаковыми.

Рассмотренная нами игра в теннис иллюстрирует и еще один важный момент. Десятиметровая дуга окружности диаметром в два световых года – это почти прямая линия. Другими словами, геодезические для предметов, движущихся в гравитационном поле Земли, практически неотличимы от обычных прямых в пространстве-времени. Это означает в свою очередь, что пространство-время около Земли почти идеально плоское. С точки зрения общей теории относительности гравитационное поле Земли следует поэтому считать *очень слабым*. Поэтому на Земле очень трудно произвести эксперименты (равно как и вообще в Солнечной системе), которые помогли бы обнаружить это очень малое искривление пространства-времени. Проверка правильности общей теории относительности – это очень трудная задача, стоящая перед физиками и астрономами.

5

ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Труды Исаака Ньютона в течение двухсот лет сохраняли свою роль краеугольного камня неколебимых основ классической механики. Практически все удавалось объяснить представлением о тяготении как о силе. Благодаря тяготению вы могли сидеть на стуле. Тяготение удерживало Луну на ее орбите около Земли. Та же сила тяготения поддерживала целостность Солнечной системы и определяла взаимодействие между звездами и галактиками.

Успехи ньютоновской механики неизменно умножались на протяжении сотен лет. В 1705 г. Эдмунд Галлей опубликовал свои расчеты орбит 24 комет. Он обнаружил, что орбиты ярких комет, наблюдавшихся в 1531, 1607 и 1682 гг., были настолько близки друг к другу, что это могла быть на самом деле *одна и та же* сильно вытянутая эллиптическая орбита с фокусом в Солнце. Развивая труды Галлея, Алексис Клеро предсказал возвращение этой кометы в 1758 г. И действительно, ее увидели тогда в ночь на Рождество; эта комета получила название *кометы Галлея* (рис. 5.1). Воспользовавшись законами Ньютона, карандашом и бумагой, астрономы открыли нового постоянного члена Солнечной системы.

С начала XIX в. астрономы стали открывать малые планеты – *астероиды*, обращающиеся вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера. 1 января 1801 г. сицилийский астроном Джузеппе Пиацци обнаружил Цереру; в марте 1802 г. Генрих Ольберс нашел второй астероид, Палладу. Затем последовали открытия Юноны в 1804 г. и Весты – в 1807 г. В каждом случае орбиты астероидов в точности соответствовали теории Ньютона.

В 1840-х годах Джон Коуч Адамс в Англии и Урбен Жан Жозеф Леверье во Франции независимо друг от друга пришли к заключению, что наблюдаемые отклонения в движении Урана могут быть объяснены существованием в Солнечной системе восьмой планеты. Как было рассказано в предыдущей главе, их вычисления привели к открытию Нептуна. Это был новый триумф ньютоновской механики.

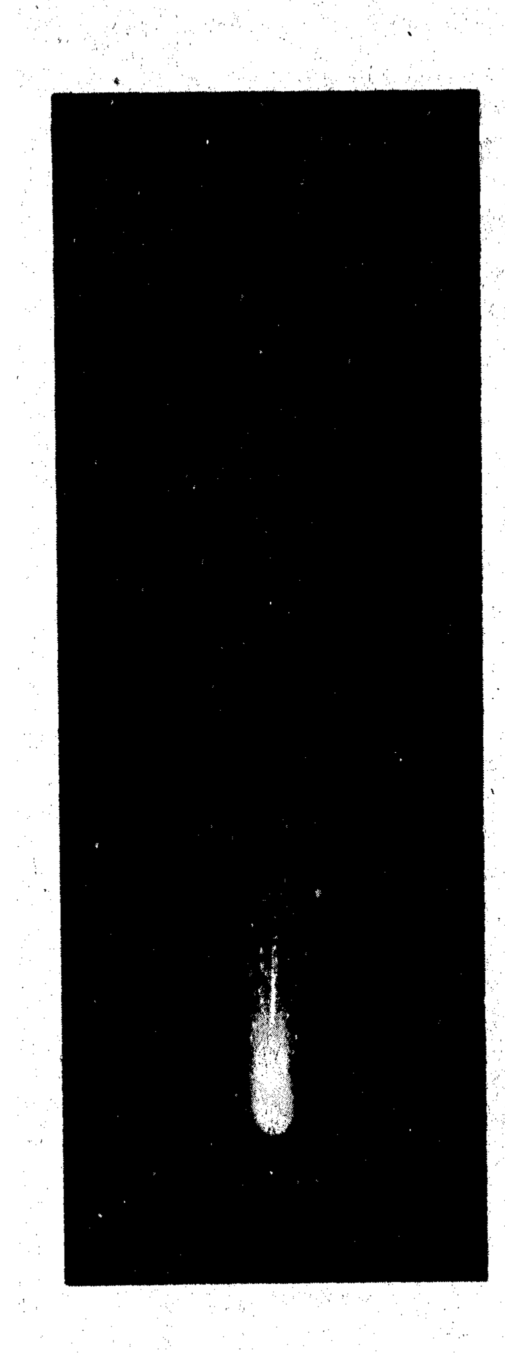


РИС. 5.1.
Комета Галлея. На основе ньютоновской механики астрономы в XVIII в. обнаружили, что эта комета является постоянным членом Солнечной системы. Период обращения кометы Галлея вокруг Солнца составляет около 76 лет, и она должна снова вернуться к Солнцу в 1986 г. (Ликская обсерватория.)

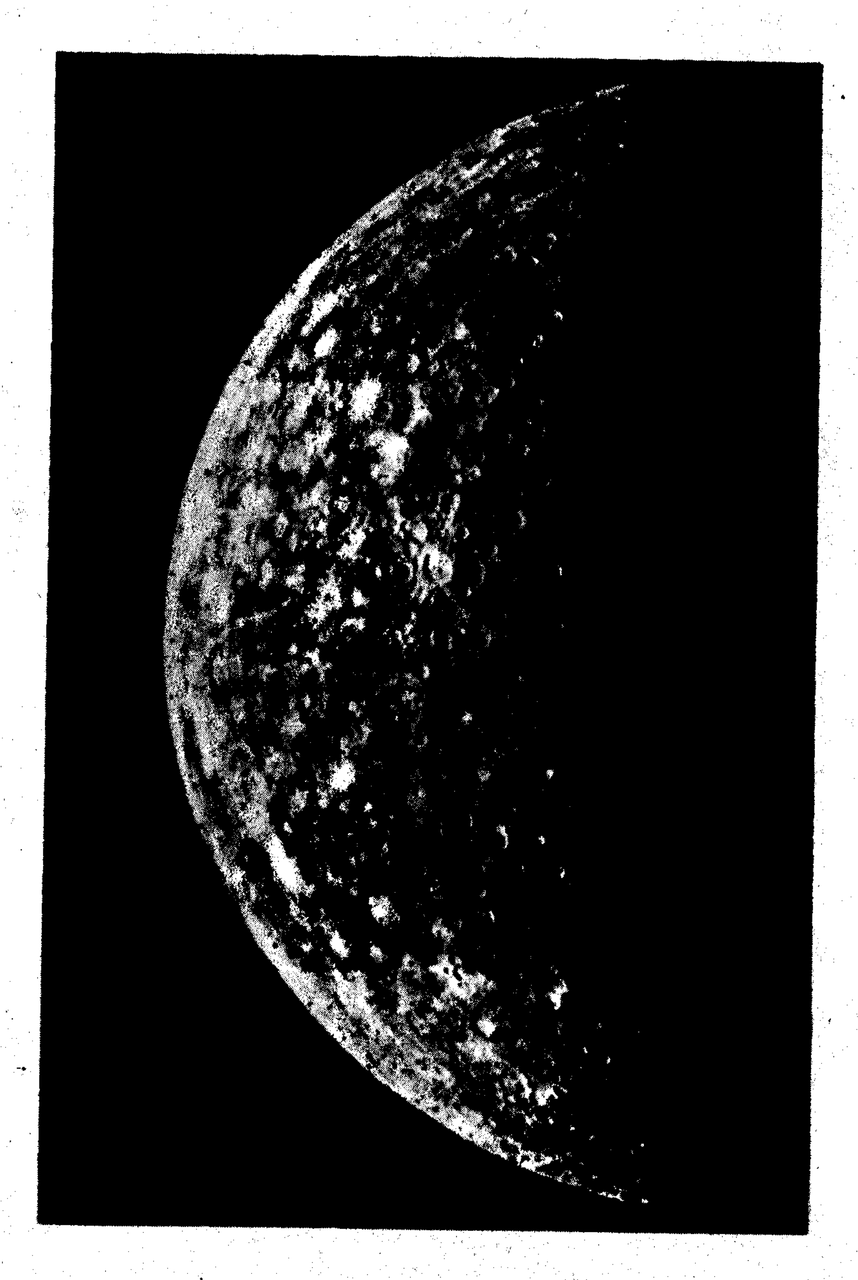


РИС. 5.2.

Меркурий. К середине XIX в. астрономы убедились, что Меркурий не движется точно по той орбите, которая предсказывается ньютоновской теорией. Хотя эти аномалии движения почти незаметны, движение Меркурия не поддается объяснению в рамках классической физики. (НАСА.)

Однако, несмотря на множество успехов, у ньютоновского закона тяготения было одно слабое место. Начиная с 1859 г. Леверье отметил, что Меркурий (рис. 5.2) не следует в точности по предвычисленной орбите. Как говорилось в предыдущей главе, все попытки объяснить аномалии в проведении Меркурия в рамках механики Ньютона оказались неудачными.

Следует подчеркнуть, что отклонения движения Меркурия от теории весьма незначительны. Согласно классической теории (т. е. теории Ньютона, Кеплера и т. п.), орбита одной отдельно взятой планеты должна быть идеальным эллипсом с Солнцем в одном из фокусов. Однако в Солнечной системе помимо Меркурия есть и другие планеты. Эти планеты тоже притягивают Меркурий, хотя и слабо, что приводит к незначительным отклонениям его орбиты от идеального эллипса. Это отклонение называется *возмущением* орбиты Меркурия. Пользуясь законом тяготения Ньютона, астрономы могли рассчитать точную величину этих возмущений. И уже на протяжении многих лет знали, что орбита Меркурия должна медленно поворачиваться под действием возмущений со стороны всех других планет. Однако наблюдаемая скорость поворота орбиты оказалась заметно *больше*, чем предсказывала теория Ньютона.

Чтобы лучше понять проблему, мучившую астрономов сто лет назад, рассмотрим какую-либо определенную точку на орбите Меркурия, скажем, точку, в которой Меркурий оказывается

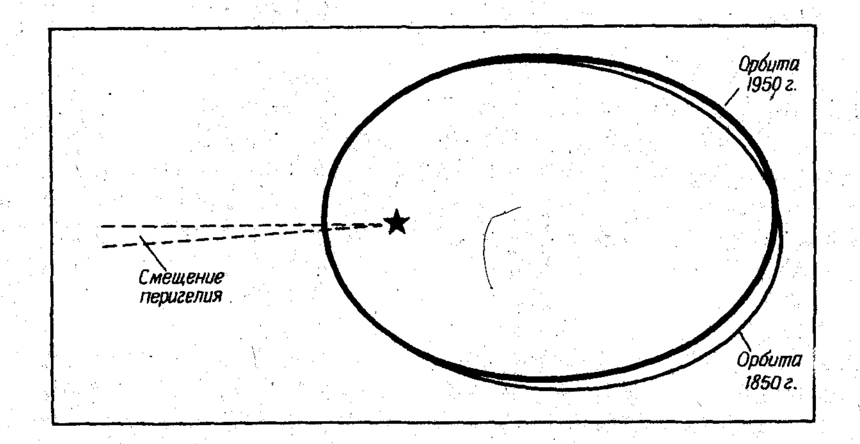


РИС. 5.3.

Движение перигелия Меркурия. Положение перигелия орбиты Меркурия смещается за столетие вперед по ходу его движения на 1°33′20″. Бóльшая часть этого смещения (1°32′37″) поддается объяснению как результат возмущений со стороны других планет.

ближе всего к Солнцу. Ее называют *перигелием*; если смотреть с Земли, она занимает определенное положение на небе. Так как орбита Меркурия очень медленно поворачивается, то почти эллиптическая траектория планеты вокруг Солнца постепенно меняет свою ориентацию. В результате очень медленно смещается и положение перигелия Меркурия. Этот эффект так мал, что за целых сто лет перигелий Меркурия поворачивается лишь на 1°33′20″, как показано на рис. 5.3. Из этого наблюдаемого полного поворота теория Ньютона может объяснить только поворот на 1°32′37″ за столетие. Остается избыточное движение перигелия, равное 43 секундам дуги за столетие, которое нельзя отнести за счет эффектов классической ньютоновской теории. Хотя такое расхождение весьма мало, к началу XX в. стало ясно, что классическая механика не может полностью объяснить особенности движения ближайшей к Солнцу планеты.

В 1916 г. Эйнштейн предложил принципиально новую теорию тяготения, названную *общей теорией относительности*. Согласно этой новой теории, гравитационное поле объекта проявляется как искривление пространства-времени. Чем сильнее гравитационное поле, тем больше кривизна пространства-времени. Частицы и световые лучи распространяются по кратчайшим мировым линиям в таком искривленном пространстве-времени – по *геодезическим*.

Разрабатывая новую теорию тяготения, Эйнштейн отчетливо понимал, что какие бы идеи он ни клал в ее основу, эта теория должна переходить в теорию тяготения Ньютона в предельном случае слабого поля. Ведь законы Ньютона очень хорошо подтверждаются наблюдениями. С помощью старой теории тяготения оказалось возможным с высокой точностью рассчитывать орбиты комет и астероидов и предсказывать существование еще не открытых планет. И в наше время при расчетах траекторий полетов космонавтов на Луну опирались только на обычную ньютонову теорию тяготения (рис. 5.4), так как гравитационные поля Земли и Луны *очень* слабы. На языке общей теории относительности пространство-время вблизи Земли или Луны почти плоское. Это обстоятельство уже отмечалось, когда мы рассматривали в предыдущей главе игру в теннис. Мы видели, что мировые линии теннисного мяча в пространстве-времени представляют собой на самом деле малые дуги окружностей очень больших диаметров. Дуга окружности диаметром в 2 световых года, если ее длина равна 100 м,– это почти прямая линия. Конечно, теория Ньютона вполне достаточна для описания траекторий теннисного мяча при игре. Иными словами, поскольку ньютонова теория вполне успешно работает в условиях слабых гравитационных полей, Эйнштейн заключил, что уравнения поля тяготения в общей теории относительности должны переходить

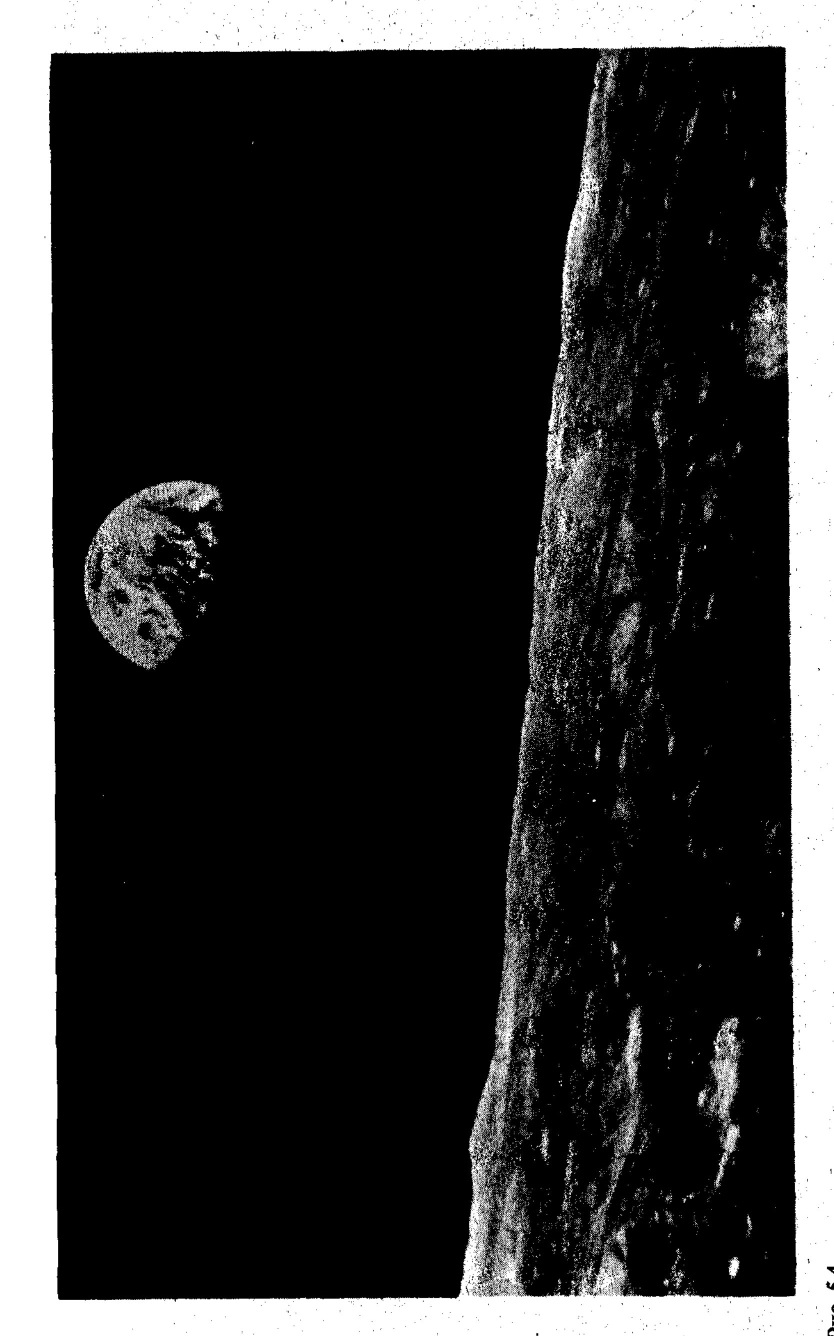


Рис. 5.4.
Картина, наблюдаемая с «Аполлона-8». Старомодной теории Ньютона с избытком хватает для расчета орбит, по которым космонавты достигают Луны и возвращаются на Землю. Эффекты общей теории относительности оказываются слишком малыми, чтобы их можно было заметить. (НАСА.)

в уравнения, описывающие закон тяготения Ньютона, когда пространство-время почти совершенно плоское.

После того как Эйнштейну удалось найти уравнения гравитационного поля в общей теории относительности, он, естественно, решил применить свою новую теорию в конкретных задачах. Прежде всего приходит в голову использовать движение планет вокруг Солнца. Согласно теории Ньютона, орбита отдельно взятой планеты – это эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Что же говорит об этом общая теория относительности?

Эйнштейн начал с уравнений гравитационного поля в пустом пространстве. Решив эти уравнения, он узнал, как искривлено пространство-время около Солнца. Зная геометрию пространства-времени, Эйнштейн перешел к решению уравнений геодезической: он хотел узнать, как движутся планеты в таком искривленном пространстве-времени. И получился *не эллипс*! В общей теории относительности орбита отдельно взятой планеты около Солнца является не просто эллипсом, а медленно поворачивающимся эллипсом. Такая орбита должна сама поворачиваться, даже без каких-либо возмущений от других планет. Поворачивающийся эллипс – это просто самая короткая мировая линия в искривленном пространстве-времени вблизи Солнца.

Оценив скорость предсказанного им поворота эллиптических орбит для планет Солнечной системы, Эйнштейн нашел, что такой эффект должен быть реально заметен лишь у Меркурия. Только в том случае, если планета находится очень близко к Солнцу, ее орбита лежит в области достаточно большой кривизны пространства-времени, чтобы можно было наблюдать релятивистский поворот орбиты. Подставив в формулу расстояние Меркурия от Солнца, Эйнштейн получил для скорости прецессии в точности 43″ за столетие – именно ту величину, которую не могла объяснить ньютонова теория. Наконец-то, более чем через полвека после своего открытия, аномалия движения Меркурия была объяснена. 15 декабря 1915 г. Эйнштейн писал своему коллеге в Польшу:

«Я высылаю Вам некоторые мои статьи. Как видите, я снова разрушил свой карточный домик и построил новый, и новая в нем по меньшей мере сердцевина. Объяснение движения перигелия Меркурия, эмпирически подтвержденное с полной несомненностью, принесло мне большую радость, но я не менее рад тому факту, что общая ковариантность закона тяготения наконец нашла свое окончательное выражение».

Объяснение поворота перигелия Меркурия явилось огромным успехом общей теории относительности. На протяжении столетий авторитет Ньютона и его закона всемирного тяготения оставался неколебимым. И вот теперь появилась новая теория тяготения, которая давала еще более точные результаты! Эта новая теория шла по революционному пути, описывая тяготение как геометрию пространства-времени. Тяготение уже стало невозможно мыслить как силу. Оказалось, что гравитационное поле тела искривляет пространство-время, а тела движутся в этом искривленном пространстве-времени по кратчайшим из возможных мировых линий.

Когда появляются новые физические представления или теории, у исследователей возникает потребность *в проверке* этих представлений и теорий, чтобы убедиться в их преимуществах по сравнению с прежними. Недостаточно, чтобы новая теория объясняла лишь уже известные результаты наблюдений и экспериментов. Желательно, чтобы она предсказывала новые явления, о которых никто до тех пор не подозревал. Вот почему, хотя в это время шла первая мировая война, Эйнштейн начал поиски новых наблюдений, с помощью которых оказалось бы возможно подтвердить или опровергнуть его общую теорию относительности. Это была нелегкая задача.

Как уже отмечалось выше, все факты, имевшие отношение к тяготению и известные астрономам и физикам, поддавались объяснению в старой ньютоновской теории; единственным исключением было движение перигелия Меркурия. В Солнечной системе пространство-время повсюду является почти совершенно плоским, так что представление о гравитации как о силе здесь вполне применимо.

Однако Солнце значительно превосходит по массе все остальные объекты Солнечной системы (рис. 5.5). Более 99% вещества Солнечной системы сосредоточено в Солнце. Поскольку оно гораздо массивнее всех остальных близких к нему небесных тел, то и создаваемое им гравитационное поле должно быть намного сильнее, чем поле любого другого члена Солнечной системы, причем самое сильное искривление пространства-времени должно иметь место вблизи поверхности Солнца. Следовательно, искать проявления эффектов общей теории относительности следует в окрестностях Солнца.

Каждая звезда на небе испускает хотя немного света, лучи которого проходят достаточно близко к поверхности Солнца. На рис. 5.6 показан луч света от звезды, проходящий рядом с Солнцем и затем идущий дальше к нам на Землю. Этот луч проходит через область искривленного пространства-времени вблизи Солнца. Поскольку свет распространяется по кратчайшей мировой линии в *искривленном* пространстве-времени, он отклоняется от своего обычного прямолинейного пути. Никто никогда всерьез не задумывался о том, что тяготение способно искривлять све-

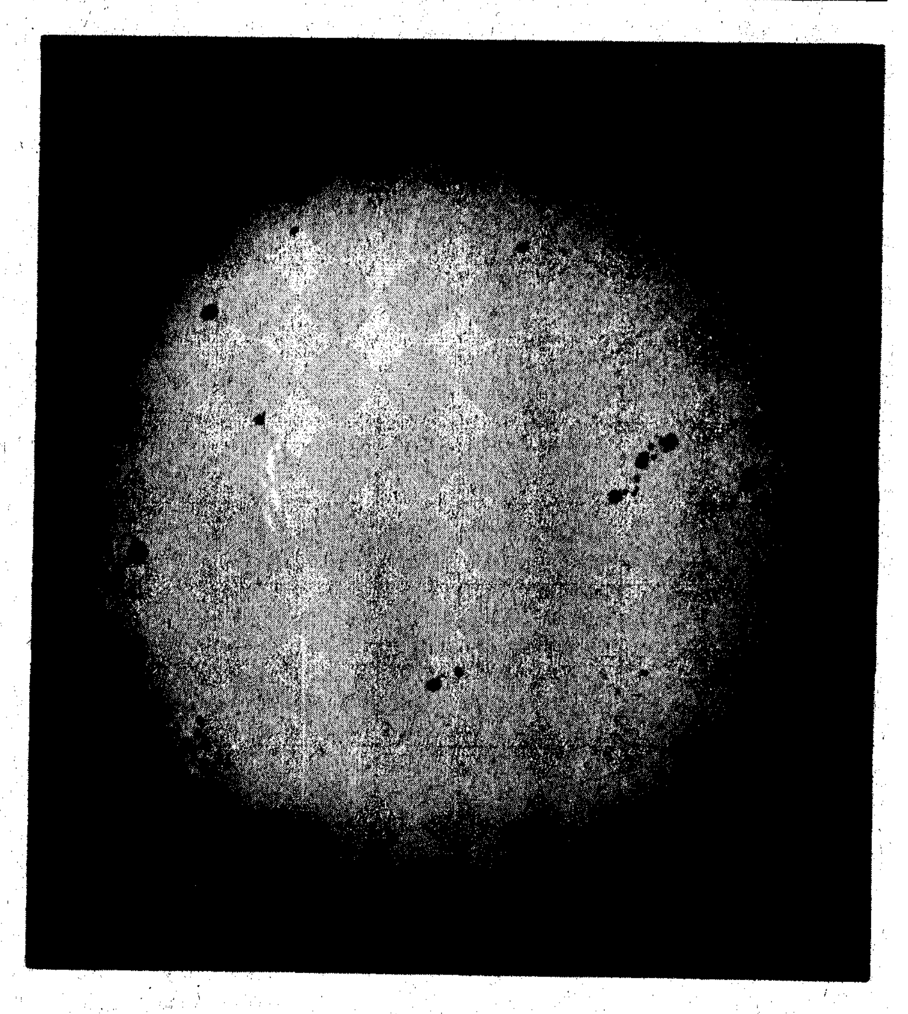


РИС. 5.5.
Солнце. Солнце – самый массивный объект в Солнечной системе. Поэтому наиболее сильное гравитационное поле в Солнечной системе сосредоточено в окрестностях Солнца. (Обсерватория им. Хейла.)

товые лучи. Однако в общей теории относительности мысль об отклонении лучей света в поле тяготения вполне естественна. В самом деле, мировые линии световых лучей обязательно должны искривляться, коль скоро они проходят через искривленные области пространства-времени.

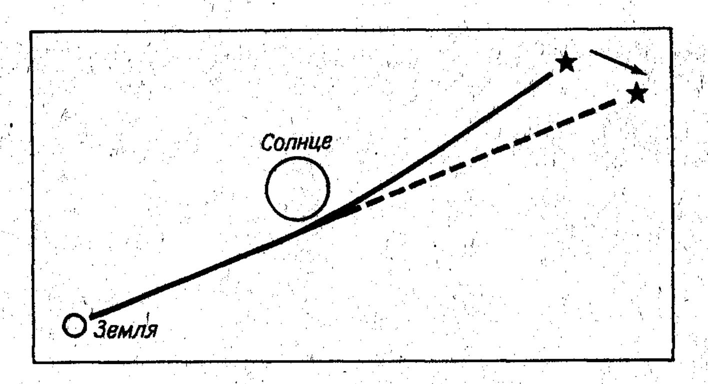


РИС. 5.6.
Отклонения лучей света Солнцем. Луч света, проходящий вблизи поверхности Солнца, отклоняется от своего прямолинейного пути под влиянием кривизны пространства-времени в окрестностях Солнца.

Как и в случае поворота орбиты Меркурия, этот эффект общей теории относительности весьма мал. В самом лучшем случае, когда световой луч проходит, касаясь поверхности Солнца, его отклонение составляет всего 1,75″. Это очень малый угол. Световые лучи, проходящие вблизи Солнца на бóльших расстояниях, должны отклоняться еще меньше, ибо их мировые линии проходят в области, где кривизна пространства-времени менее заметна. Если взглянуть с Земли (см. рис. 5.6), наблюдаемое положение звезды на небосводе рядом с Солнцем должно отодвинуться от Солнца на угол, не превышающий 1,75″.

Днем звезды увидеть нельзя – слишком уж ярко светит Солнце. Однако при полном солнечном затмении (рис. 5.7) Луна полностью закрывает ослепительный солнечный диск, и звезды становятся на несколько минут видимыми. Если сравнить фотографии звезд, оказавшихся вблизи Солнца во время полного затмения, и фотографии той же части неба, снятые за несколько месяцев до затмения, когда Солнце находится среди других созвездий, в руки астрономов попадут новые данные для проверки общей теории относительности Эйнштейна.

Для наблюдения полного солнечного затмения 29 мая 1919 г. Королевское общество Англии снарядило две экспедиции астрономов. Одна экспедиция отправилась в Бразилию, а другая – на западное побережье Африки. Первые же измерения на отснятых фотопластинках стали величайшим событием в жизни сэра Артура Эддингтона, руководителя африканской экспедиции. Предсказание Эйнштейна о гравитационном отклонении лучей света было подтверждено с полной несомненностью.

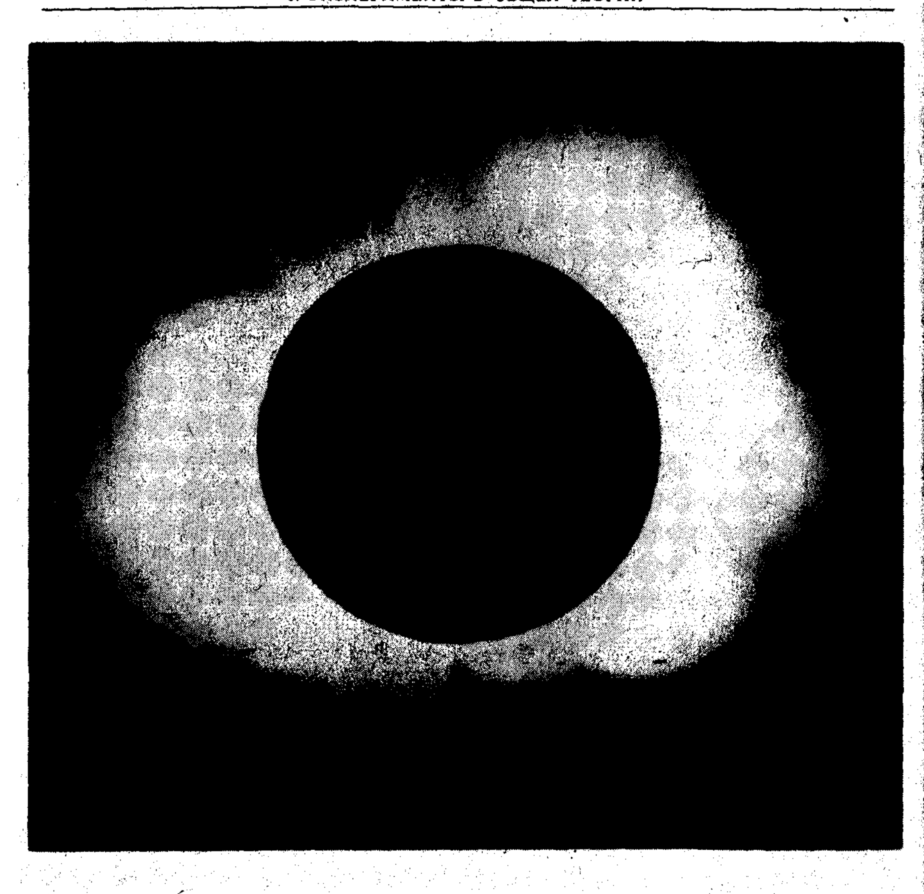


РИС. 5.7.
Полное солнечное затмение. Во время фазы полного затмения на небе вблизи Солнца можно увидеть звезды (правда, на этом снимке, предназначенном для наблюдений солнечной короны, их не видно). Точное измерение смещения положений звезд, наблюдаемых вблизи Солнца во время полного затмения, дало важное подтверждение общей теории относительности. (Обсерватория им. Хейла.)

С тех пор почти при каждом солнечном затмении астрономы стремятся провести очередное измерение отклонения света звезд Солнцем. Так как солнечные затмения нередко наблюдаются лишь в труднодоступных местах Земли, то астрономам, желающим провести наблюдения, приходится странствовать со всем своим оборудованием куда-нибудь вверх по Амазонке или среди песков пустыни Сахары. Когда наступает момент полного затмения, эти несчастные, возможно, стоят по колени в болоте, облепленные москитами и осаждаемые еще более опасными тварями. Выражаясь языком науки, «экспериментальные погрешности» при таких наблюдениях затмений зачастую оказываются слишком большими. Но должен найтись выход из положения!

Потребность более строгой проверки общей теории относительности стала ощущаться особенно остро к концу 1960-х годов. К этому времени ряд хитроумных физиков предложили новые теории тяготения, приобретшие определенную популярность. Эти новые теории сохранили многие особенности общей теории относительности, поскольку они тоже выражают тяготение через кривизну пространства-времени. Но величина искривления пространства-времени в этих теориях оказывалась несколько иной, чем вычисленная по теории Эйнштейна. Наиболее популярная из этих неэйнштейновских теорий была сформулирована Р. Дикке и Ч. Брансом в Принстонском университете. Как в ньютоновской, так и в эйнштейновской теории тяготения имеется одно важное число – *гравитационная постоянная*. Ее значение через посредство ряда математических выражений указывает соотношение между «силой» тяготения и силой остальных взаимодействий в природе. Указанное число было измерено в лабораторных экспериментах, причем получилось значение $G = 6{,}688 \cdot 10^{-8}$ дин/см$^2 \cdot$г^2. Однако в конце 1930-х годов великий английский физик П. А. М. Дирак выразил серьезное сомнение в том, что величина гравитационной постоянной была всегда такой же, как сейчас. Он выдвинул ряд интересных доводов в пользу того, что, возможно, в далеком прошлом величина гравитационной постоянной была намного больше, а затем постепенно убывала со временем. Бранс и Дикке развили эту мысль и сформулировали новую релятивистскую теорию тяготения, в которой гравитационная «постоянная» *переменна*. Уравнения поля тяготения в теории Бранса – Дикке очень похожи на уравнения теории Эйнштейна, но включают дополнительно ряд слагаемых, благодаря которым гравитационная постоянная может измениться. Окончательный вывод из теории Бранса – Дикке состоит в том, что отклонение лучей света Солнцем и величина смещения перигелия Меркурия должны быть несколько меньше, чем дает теория Эйнштейна. Но точность измерения отклонения света при полных солнечных затмениях не настолько велика, чтобы сделать выбор между двумя конкурирующими теориями.

В 1960-х годах астрономы открыли на небе объекты, названные *квазарами*. На первый взгляд квазары выглядят как обычные звезды, но при более тесном знакомстве у них обнаруживаются многие свойства, обычно присущие лишь далеким галактикам. Хотя мы до сих пор не разгадали природу квазаров, мы уже знаем, что они излучают огромное количество радиоволн.

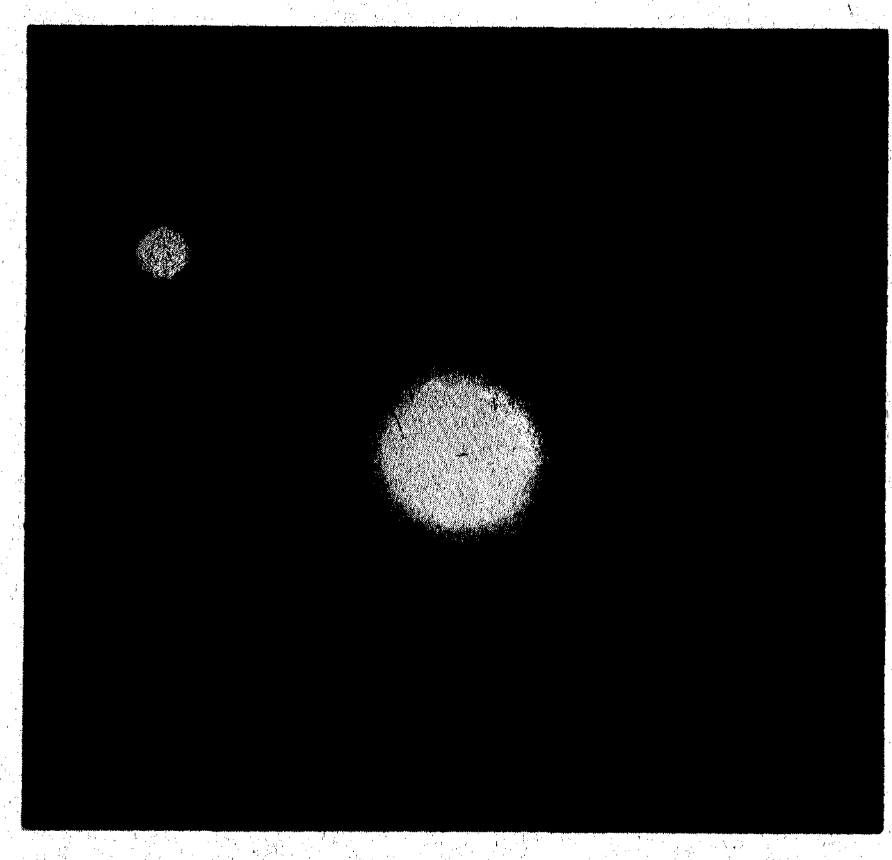


РИС. 5.8.
Квазар 3C 273. Квазары – мощные источники космических радиоволн. Измеряя отклонение радиоволн, приходящих к нам от квазара 3C 273, под действием тяготения Солнца, астрономы получили новое подтверждение правильности общей теории относительности. (Обсерватория им. Хейла.)

Факт чрезвычайной «яркости» квазаров в радиодиапазоне подсказал радиоастрономам идею важного эксперимента. Ежегодно 8 октября Солнце в своем видимом движении по небу проходит мимо квазара 3C 273 (рис. 5.8). Когда Солнце приближается к тому месту на небосводе в созвездии Девы, где находится квазар 3C 273, радиоволны, идущие от квазара, должны отклоняться точно таким же образом, как обычный свет от звезд. Так как Солнце в радиодиапазоне «светит» сравнительно слабо, то радиоастрономам не нужно дожидаться солнечного затмения в каком-нибудь заброшенном уголке Земли – наблюдения можно

проводить на радиоастрономической обсерватории со всеми удобствами.

В начале 1970-х годов радиоастрономы провели ряд наблюдений отклонения радиоволн Солнцем. В октябре 1972 г. измерялись угловые расстояния между квазарами 3C 273 и 3C 279. Когда Солнце сближалось на небосводе с квазаром 3C 273, угловое расстояние на небе между этими двумя квазарами слегка изменялось вследствие отклонения радиоволн, идущих от квазара 3C 273. Результаты наблюдений с чрезвычайно высокой степенью точности соответствовали общей теории относительности Эйнштейна.

Лучше всего разобраться в том, как геометрия пространства-времени влияет на поведение световых лучей и частиц, можно с помощью так называемых диаграмм вложения. Как упоминалось в предыдущих главах, наглядно представить себе искривленное 4-мерное пространство-время невозможно. Чтобы обойти эту трудность, физики-теоретики иногда предпочитают представить себе явления в двух измерениях, а затем обобщить результаты на случай четырех измерений. Бывает и так, что они для лучшего понимания следствий из своих уравнений «выключают» два измерения из четырех и рассматривают получившуюся двумерную искривленную поверхность. Образно говоря, суть дела сводится к сечению искривленного пространства-времени и исследованию вида получающейся поверхности. Это можно сравнить с тем, как вы стали бы разрезать торт, чтобы увидеть последовательность слоев теста и крема и расположения глазури. Срез через пространство-время называется *гиперповерхностью*, а если срез делается перпендикулярно оси времени, то гиперповерхность называется *пространственноподобной*. Изображать такие пространственноподобные гиперповерхности – значит строить *диаграммы вложения*.

Для лучшего понимания диаграмм вложения рассмотрим плоское пространство-время – его можно найти где-нибудь вдали от всех источников тяготения. Срез через плоское пространство-время дает нам плоскую двумерную гиперповерхность. Эта поверхность является плоской в том же самом смысле, в каком мы говорим о плоском поле или плоской поверхности стола. Изображение такой поверхности (см. рис. 5.9) и есть, по существу, диаграмма вложения.

Обратимся теперь к искривленному пространству-времени вокруг Солнца. Солнце не изменялось на протяжении миллиардов лет, так что не изменялась и геометрия пространства-времени вокруг него. И пространственноподобная гиперповерхность будет выглядеть через миллиард лет так же, какой она была миллиард лет назад. Однако если такое пространство-время рассечь, то получившаяся гиперповерхность *уже не будет* плоской ввиду

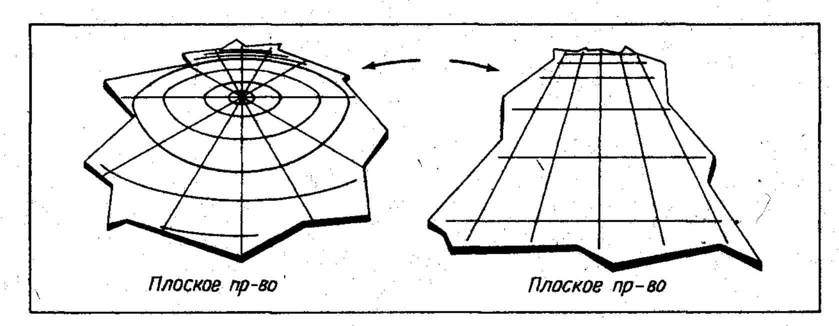


РИС. 5.9.
Плоское пространство. Диаграмма вложения для плоского пространства-времени выглядит просто как обычная плоскость. Положение точек на такой пространственноподобной гиперповерхности может быть охарактеризовано как прямоугольными (справа), так и полярными (слева) координатами.

искривляющего воздействия гравитационного поля Солнца. На рис. 5.10 приведена диаграмма вложения, изображающая это искривление. Штриховкой помечена область, где находится Солнце. Диаграмма вложения в сущности показывает, как действовала бы гравитация, если бы мы жили не в четырехмерном пространстве-времени, а в двумерном пространстве. Она поясняет, как тяготение влияет на кривизну пространства.

С помощью диаграммы вложения можно наглядно представить себе эффект отклонения света звезд (или радиоволн от квазаров). Поскольку гиперповерхность на рис. 5.10 не плоская, световые лучи, распространяющиеся по этой искривленной поверхности, не будут прямолинейными. Как видно на рис. 5.11, геодезические, по которым следуют световые лучи звезд, искривлены, и потому кажется, что звезды сдвинуты со своих обычных мест.

Если диаграммы вложения помогают сделать наглядными пространственные эффекты общей теории относительности, то влияние тяготения на время можно оценить, рассматривая поведение часов. Согласно теории Эйнштейна, *тяготение замедляет ход часов.* Чем сильнее гравитационное поле, тем значительнее становится замедление времени. Представим себе, например, двух людей в доме. Один из них живет на первом этаже, а второй – на чердаке, как это изображено на рис. 5.12. Человек на первом этаже ближе к центру Земли и поэтому находится в чуть более сильном гравитационном поле, чем человек на чердаке. Сравнивая показания своих часов, они обнаружат, что часы на первом этаже идут (измеряют время) несколько медленнее, чем на чердаке. Это *не значит,* что часы, находящиеся далеко от Зем-

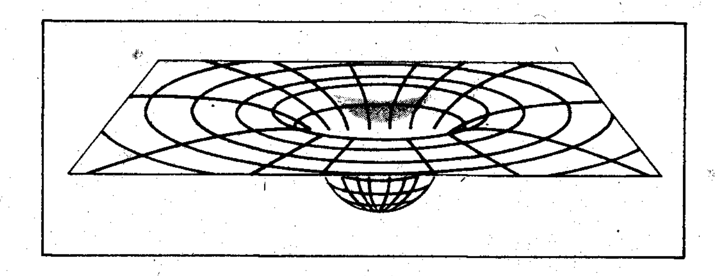


РИС. 5.10.
Искривленное пространство. Диаграмма вложения наглядно изображает кривизну пространства вблизи Солнца. Штриховкой показано местоположение Солнца. (По Мизнеру, Торну и Уилеру.)

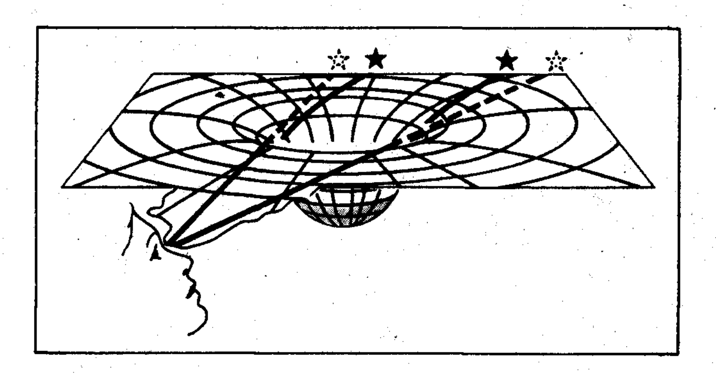


РИС. 5.11.
Отклонение света звезд. Отклонение световых лучей в общей теории относительности можно без труда понять, исходя из диаграммы вложения. Мировые линии световых лучей – геодезические (т.е. кратчайшие возможные пути) *на гиперповерхности.* Так как эта поверхность искривлена, то искривлены и пути. (По Мизнеру, Торну и Уилеру.)

ли будут сильно спешить. В плоском пространстве-времени (вдалеке от всех источников тяготения) все часы идут с одной и той же постоянной скоростью. Часы же в гравитационном поле идут медленнее. Говоря конкретно, часы на поверхности Земли по сравнению с часами в космосе отстают за месяц примерно на одну миллиардную секунды.

Гравитационное замедление времени – это третий эффект, предсказанный Эйнштейном для проверки общей теории относительности. В отличие от движения перигелия Меркурия и откло-

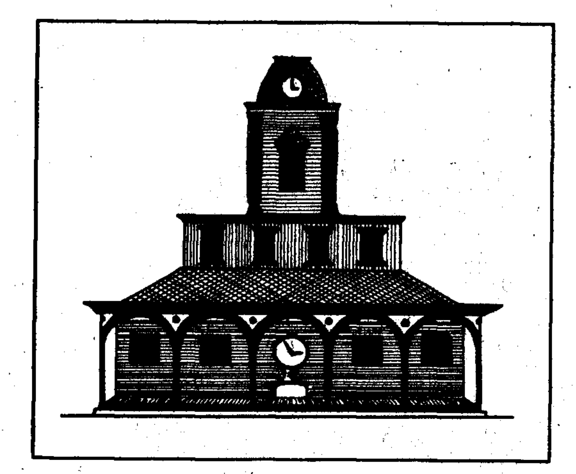


РИС. 5.12.
Замедление течения времени. Тяготение приводит к замедлению течения времени. Часы на первом этаже здания идут медленнее, чем часы на чердаке.

нения света Солнцем этот третий эффект настолько мал, что наука не располагала достаточно точными часами, чтобы его непосредственно измерить. В конце 1950-х годов, вскоре после смерти Эйнштейна, немецкий физик Рудольф Мёссбауэр открыл в ядерной физике один важный эффект. Этот *эффект Мёссбауэра*, за открытие которого его автор получил Нобелевскую премию, позволяет использовать атомные ядра в качестве исключительно точных часов. Это важное открытие нашло множество практических применений, а в 1959 г. Р. В. Паунд и Дж. А. Ребка в Гарвардском университете обнаружили, что эффект Мёссбауэра можно использовать для проверки общей теории относительности.

Любой источник света можно рассматривать как часы. Атомы излучают свет на определенных длинах волн или частотах, а время можно измерять, определяя частоту (скажем, число колебаний в секунду) этого света. Поскольку гравитация замедляет ход времени, то свет, испущенный атомами в гравитационном поле, будет «сдвинут» в красную сторону – в сторону более длинных волн или более низких частот (т. е. станет делать меньшее число колебаний в секунду). Поэтому эйнштейновское предсказание о замедлении течения времени часто называют *гравитационным красным смещением.*

Свет, испускаемый атомами, нельзя использовать для измерения гравитационного красного смещения на Земле, так как атомы испускают его не со столь точно выдержанными частотами, чтобы удалось заметить то ничтожно малое замедление времени, которое имеет место на поверхности Земли. Однако эффект Мёссбауэра справедлив и для излучения гамма-лучей радиоактивными ядрами, скажем, кобальта (^{60}Co) или железа (^{57}Fe). Открытие Мёссбауэра свидетельствует, что подобные радиоактивные изотопы способны излучать гамма-лучи с поразительно точно выдержанными частотами. Паунд и Ребка осознали, что такая точность уже достаточна для обнаружения гравитационного красного смещения прямо здесь, на Земле.

Опыт Паунда и Ребки проводился в Джефферсоновской физической лаборатории Гарвардского университета (США). Гамма-лучи испускались ядрами радиоактивного кобальта (^{60}Co), источник гамма-лучей находился в подвале. Лучи проходили сквозь отверстия, сделанные в междуэтажных перекрытиях, и доходили до поглотителя в надстройке на крыше, расположенной на высоте 22,5 м. Измеряя частоту поглощенных гамма-лучей, Паунд и Ребка нашли, что она уменьшилась в точности настолько, насколько предсказывалось теорией Эйнштейна. Эксперимент был повторен в 1965 г. Р. В. Паундом и Дж. Л. Снайдером с таким же результатом. Наконец-то было подтверждено гравитационное замедление течения времени (см. рис. 5.13)!

Опубликование в конце 1915 г. статьи Эйнштейна «К общей теории относительности» оказало глубокое воздействие на всю

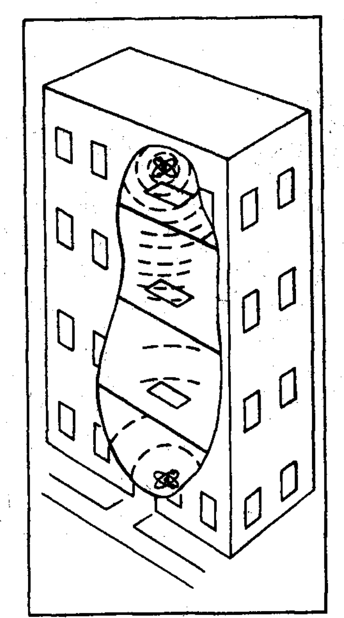


РИС. 5.13.
Гравитационное красное смещение. Время замедляет свое течение в гравитационном поле. Поэтому гамма-лучи, испущенные радиоактивными ядрами в подвале здания, должны обладать меньшей частотой, чем точно такие же гамма-лучи, испущенные таким же источником на чердаке.

науку. Более чем на протяжении двух столетий ньютонова механика казалась точной в приложении практически ко всем задачам, касавшимся тяготения. Но теперь появилась новая теория, дающая еще более точные результаты и потребовавшая радикального пересмотра наших представлений о пространстве и времени. Однако после первых восторгов ученые осознали, насколько трудно выявлять эффекты общей теории относительности. Поэтому довольно быстро все вернулись к использованию прежней ньютоновской теории. Математические методы этой теории намного проще, чем методы решения уравнений Эйнштейна, и в 99,99% случаев представление о гравитации как об обычной силе приводило к правильным результатам. Общая теория относительности не вызывала интереса.

Интерес к эффектам и предсказаниям общей теории относительности возродился в конце 1960-х годов. Подобное оживление было вызвано прежде всего тем, что астрофизики стали лучше понимать процессы эволюции звезд. Как станет ясно из двух последующих глав, в результате «смерти» звезды гравитационное поле может стать настолько сильным, что пространство-время там «свернется» и звезда исчезнет из нашей Вселенной. Останется то, что мы называем *черной дырой*. Кривизна пространства-времени вокруг черной дыры настолько велика, что там можно даже указать место, где время остановится! Теперь гравитационное красное смещение господствует над всем – оно уже не ничтожно слабый эффект!

Гравитационное красное смещение – это всегда *замедление* течения времени. Дело в том, что гравитация всегда проявляет себя как притяжение. До сих пор никогда не наблюдалось гравитационное отталкивание (антигравитация). Однако, рассматривая ниже вращающуюся черную дыру, мы обнаружим, что теоретически возможно путешествие *сквозь* такую черную дыру в области пространства-времени, где тяготение отрицательно. В этом мире антигравитации время течет быстрее и часы спешат. Антигравитация – вот подарок для любителей спешить!

6

ЗВЕЗДЫ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

Когда мы глядим ночью на звездное небо, оно кажется нам навеки застывшим и неизменным. Даже для самого внимательного наблюдателя сочетания звезд, которые мы называем созвездиями, кажутся сегодня точно такими же, какими они были тысячелетия назад. Те звезды, которые светили ярче всех, самими яркими и остались, а едва видные звезды так и остались самыми слабыми. Однако самое простое размышление показывает, что кажущаяся неизменность неба – всего лишь иллюзия. Мы можем наблюдать звезды только потому, что они испускают свет. А испуская свет, они теряют энергию. Истощение их энергетических ресурсов должно приводить к изменениям в недрах звезд. Иными словами, звезды должны эволюционировать.

Представим себе какое-нибудь маленькое насекомое в лесу. Пусть оно наделено достаточно проницательным умом, но продолжительность его жизни невелика – скажем, оно живет всего 24 ч. Глядя вокруг себя, это насекомое видит огромные деревья, вздымающиеся высоко вверх. Оно видит зеленые побеги, пробивающиеся из влажной почвы, и отдельные гниющие стволы, в беспорядке валяющиеся на земле. Лес представляется этому насекомому вечным и неизменным. За всю свою жизнь (24 ч!) наше насекомое не обнаружит ни одного свидетельства, которое противоречило бы его первоначальному впечатлению. Однако, призвав на помощь разум, оно пришло бы к замечательным выводам. Может быть, лес изменяется? Может быть, тонкие зеленые побеги подрастут и станут деревьями? Может быть, самые старые деревья в конце концов падают на землю, превращаются в гниющие стволы и удобряют почву для будущих поколений деревьев? Несмотря на кажущуюся неизменность леса, это насекомое способно обнаружить существование жизненного цикла окружающих деревьев.

Чтобы выявить существование жизненного цикла звезд, астрономы должны начать с вопроса: что такое звезды? Глядя на небо, они видят яркие звезды и звезды слабые, звезды голубоватые и красноватые. Астрономам отсюда сразу же становится

ясно, что первое впечатление может оказаться совершенно неверным. Например, вы смотрите на яркую звезду в небе, а ведь вы не можете узнать, насколько ярка эта звезда *на самом деле*. Может быть, это исключительно яркая звезда, находящаяся очень далеко от Земли, но может быть, что это слабая звезда, только она случайно оказалась поблизости. *Кажущаяся* яркость звезд не говорит астрономам ничего существенного о внутренних свойствах этих звезд. Астроном предпочел бы знать *абсолютную* яркость звезды. Абсолютная яркость показывает, насколько яркой является звезда в действительности, т.е. сколько же энергии эта звезда испускает в пространство.

Видимая и абсолютная яркости звезды связаны между собой через расстояние до звезды. Чтобы понять причину этого, вспомним вид уличных фонарей темной ночью. Одного только субъективного ощущения яркости фонаря для ваших глаз вам недостаточно, чтобы сказать, насколько ярко светит этот фонарь на самом деле. Это может быть 100-ваттная лампочка поблизости или 500-ваттная – вдали от вас. Но если вы знаете расстояние до фонаря, можно прикинуть, насколько ярко светит фонарь в действительности. Существует очень простая связь между видимой яркостью, абсолютной яркостью и расстоянием. При известных видимой яркости и расстоянии всегда можно найти его действительную, или абсолютную, яркость. И эта абсолютная яркость укажет вам основное свойство источника света! Она укажет, какую мощность в ваттах лампа (или звезда) излучает в действительности.

Начиная с середины XIX в. астрономы усовершенствовали в конце концов технику измерения параллакса до такой степени, что смогли измерить расстояния до многих звезд. Как говорилось в гл. 1, нахождение параллакса – это прямой, хотя и трудоемкий способ непосредственного измерения расстояния до звезд. В результате астрономы, зная расстояния до звезд, без труда рассчитали их абсолютную яркость. Наконец-то они выяснили, насколько ярки звезды на самом деле!

Выражать абсолютную яркость, или *светимость*, звезды удобно, если указать, насколько эта звезда ярче или слабее, чем Солнце. Значит, светимость Солнца принимается за единицу: Солнце светит с абсолютной яркостью в «1 Солнце». Многие звезды излучают лишь одну сотую того света, который дает Солнце. Их светимость равна приблизительно «1/100 Солнца». Напротив, многие звезды излучают в тысячи раз больше света, чем наше солнце. Например, яркая голубая звезда Ригель в созвездии Ориона обладает светимостью 50000 Солнц. Выяснилось, что Ригель – это одна из самых ярких (в абсолютном смысле) звезд, известных в астрономии.

Кроме истинной светимости звезд астрономы хотели бы еще

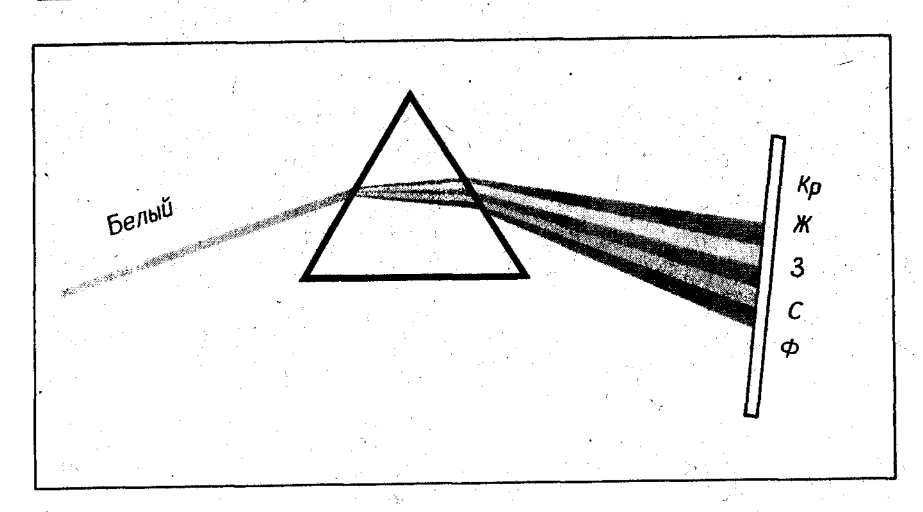


РИС. 6.1.
Спектр. Когда белый свет проходит сквозь призму, он разбивается на лучи всех цветов радуги. Такое разложение называется *спектром*; в нем часто содержатся тонкие черные линии, вызванные химическими элементами, которые содержатся в источнике света.

знать их температуру, химический состав, а также количество вещества, из которого они состоят. Решающие шаги в этом направлении были сделаны в результате ряда замечательных открытий, начавшихся также с середины XIX в. Со времен Исаака Ньютона было известно, что белый свет, проходя сквозь стеклянную призму, разбивается на лучи всех цветов радуги. Такая цветовая радуга называется *спектром* (см. рис. 6.1). В 1815 г. немецкий оптик Йозеф Фраунгофер заметил, что в спектре Солнца на яркие цвета радуги накладываются слабые темные линии. Истинная природа этих *спектральных линий* оставалась неизвестной вплоть до 60-х гг. XIX в., когда выяснилось, что они обусловлены различными химическими веществами, содержащимися в источнике света. Трудами великих физиков (Макса Планка, Нильса Бора и др.) было показано, что спектральные линии вызываются переходами электронов с орбиты на орбиту внутри атома. При таких переходах электроны поглощают или испускают свет строго определенных длин волн. Эти процессы и определяют картину спектральных линий. Разные химические вещества состоят из атомов разных типов и дают поэтому различные и притом вполне определенные системы спектральных линий. Иными словами, химические элементы в источнике света оставляют свои «отпечатки пальцев» на испускаемом им излучении в виде характерных спектральных линий. Отождествляя эти линии, физик или астроном может определить химический состав источника света.

Исследуя спектры звезд, астрономы в конце концов смогли выяснить, из чего состоят эти звезды. На основании многолетних исследований теперь известно, что звезды состоят в основном из водорода и гелия. От 50 до 80% вещества звезд – это водород, легчайший из элементов. А вместе с гелием водород составляет от 96 до 99% массы большинства звезд. Значит, на более тяжелые элементы остается в общей сложности менее 4% массы. Из этих элементов наиболее распространены кислород, азот, углерод, неон, магний, аргон, хлор, кремний, сера и железо.

Хотя все звезды, грубо говоря, состоят из одних и тех же химических элементов, их спектры сильно различаются. Например, на рис. 6.2 приведены спектры трех типичных звезд. Они имеют примерно одинаковый *химический состав*, и все же в спектрах видны совсем разные сочетания спектральных линий, поскольку весьма различны *температуры* этих трех звезд. Температура атмосферы звезды особенно сильно сказывается на том, какие именно спектральные линии каких элементов будут наиболее интенсивными. Возьмем очень горячую звезду, температура на поверхности которой равна 25 000 градусов по абсолютной шкале (т. е. 25 000 K). Газы в атмосфере этой звезды настолько раскалены, что у многих атомов оторваны их внешние электроны. Такие атомы не могут испускать спектральных линий в видимой области спектра. Точнее говоря, лишь гелий способен удержать при таких температурах все свои электроны. Следовательно, те звезды, в спектрах которых преобладают линии гелия, должны обладать поверхностной температурой около 25 000 K. Другой

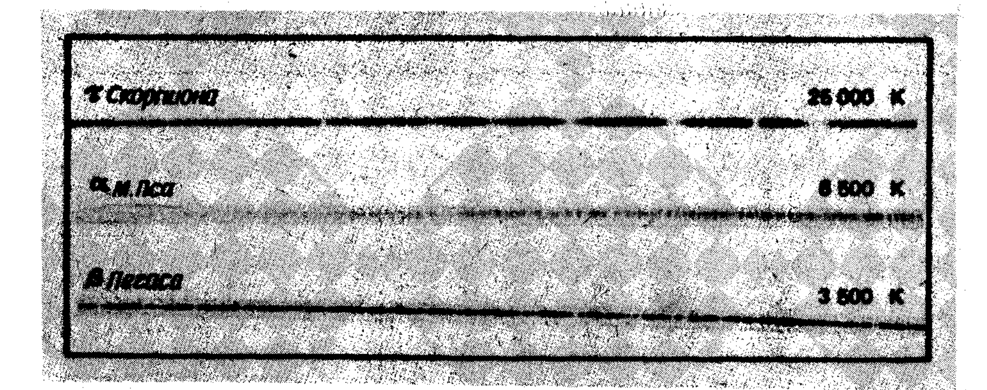


РИС. 6.2.

Спектры звезд. Три звезды – Альфа Малого Пса, Тау Скорпиона и Бета Пегаса – обладают почти одинаковым химическим составом. Вид их спектров очень различен ввиду совершенно разных поверхностных температур этих трех звезд. (Обсерватория им. Хейла.)

пример – холодная звезда, температура поверхности которой равна всего 3000 K. При столь низких температурах атомы могут объединяться в молекулы. В спектрах таких звезд преобладают линии молекул окиси титана, хотя титан – довольно редкий элемент. Наконец, в спектре Солнца имеется много линий таких металлов, как кальций и магний, а также линии кремния. Астрономы отсюда заключили, что температура на поверхности Солнца должна быть около 6000 K, поскольку эти температурные условия наиболее подходящи (там «не слишком жарко» и «не слишком холодно») для образования спектральных линий этих элементов.

Так, изучая спектры звезд, астрономы выяснили, из чего состоят эти звезды. Одновременно – и это, может быть, еще важнее – удалось определить температуры поверхностей звезд. Так астрономы узнали, сколь горячи звезды.

Зная истинную светимость и поверхностную температуру звезды, астрономы могут сделать много важных заключений. Незадолго до начала первой мировой войны датский астроном Эйнар Герцшпрунг и американский астроном Генри Норрис Рассел независимо друг от друга обнаружили, как много интересных выводов можно получить из диаграммы светимость – температура. Как видно из рис. 6.3, светимости звезд откладываются по вертикальной оси, а поверхностная температура – по горизонтальной оси. Каждую звезду на небе, для которой известны ее светимость и температура, можно изобразить в виде точки на этом графике. Например, светимость Солнца равна 1, а его поверхностная температура близка к 6000 K; поэтому Солнце изображается точкой вблизи середины диаграммы. В честь создавших его астрономов график, приведенный на рис. 6.3, называется *диаграммой Герцшпрунга – Рассела.*

Сразу видно, что точки, изображающие реальные звезды, не разбросаны беспорядочно по всей диаграмме Герцшпрунга – Рассела. Напротив, они группируются в трех основных областях. Большинство звезд, которые мы видим на небе, принадлежат к *главной последовательности.* Главная последовательность проходит через всю диаграмму по диагонали от ярких горячих звезд в левом верхнем углу к слабым холодным звездам в правом нижнем углу. Точка, изображающая Солнце, находится в середине главной последовательности, и поэтому мы говорим, что Солнце – это звезда главной последовательности.

Кроме главной последовательности имеется другая большая группа звезд в правом верхнем углу диаграммы Герцшпрунга – Рассела. Эти звезды являются яркими и холодными. Они излучают света в тысячи раз больше, чем Солнце, но их поверхностные температуры составляют всего от 3000 до 4000 K. Значит, эти звезды должны быть гигантскими по своим разме-

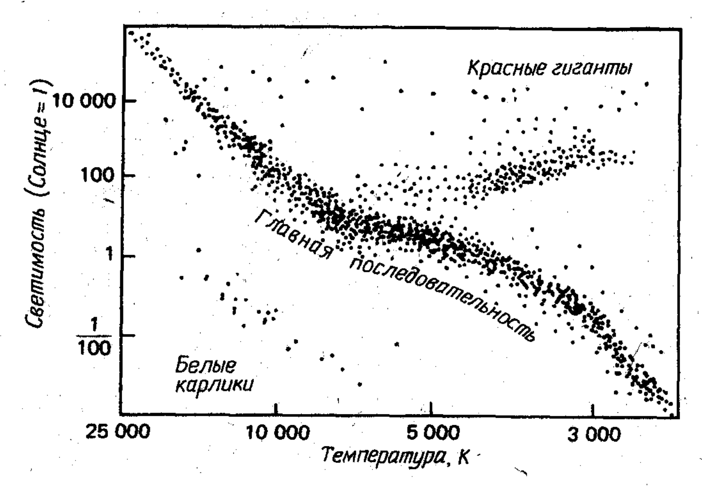


РИС. 6.3.
Диаграмма Герцшпрунга–Рассела. Распределение звезд по светимости и температуре удобнее всего представить в виде подобной диаграммы. Большая часть звезд сосредоточена в трех основных областях – на главной последовательности, среди красных гигантов и среди белых карликов.

рам. Если поместить одну из них в центре Солнечной системы, то орбита Земли окажется расположенной ниже ее поверхности. Для таких звезд обычны диаметры в несколько сотен миллионов километров. Поскольку эти звезды холодные, они излучают главным образом красноватый свет. Поэтому их называют *красными гигантами.*

Почти каждая красноватая звезда, которую можно увидеть на небе,– это красный гигант. Поистине яркие примеры – Бетельгейзе в Орионе, Антарес в Скорпионе, Альдебаран в Тельце. Все прочие звезды, видимые невооруженным глазом,– это звезды главной последовательности.

В хороший телескоп можно обнаружить звезды еще одного типа, которые не относятся ни к красным гигантам, ни к главной последовательности. Этот третий тип включает очень горячие и очень слабые звезды. Характерная поверхностная температура этих звезд от 10000 до 20000 К, а излучают они лишь 1/100 часть света, испускаемого Солнцем. Поэтому точки, изображающие эти звезды, сосредоточены в нижнем левом углу диаграммы Герцшпрунга – Рассела. Очень горячие звезды испускают в основном голубовато-белый свет; значит, эти слабые звезды должны быть очень невелики. Как правило, они имеют размеры, близкие к размерам Земли (т. е. диаметр порядка 15000 км), и поэтому их называют *белыми карликами.*

Роль диаграммы Герцшпрунга – Рассела трудно переоценить.

По многим причинам ее вполне можно назвать самым важным графиком во всей астрономии. Существуют какие-то важные причины, по которым большинство звезд – это либо звезды главной последовательности, либо красные гиганты, либо белые карлики. Разумеется, существует несколько исключений, но факт остается фактом – большинство звезд миллиарды лет своей биографии остаются членами одного из этих трех основных типов.

В начале главы мы отметили, что звезды должны эволюционировать. Это означает, что на протяжении всего времени жизни звезда должна менять свою светимость и поверхностную температуру. Иными словами, точка, изображающая звезду, должна перемещаться по диаграмме Герцшпрунга – Рассела. Поэтому понять, как звезды меняют свое положение на диаграмме Герцшпрунга – Рассела,– значит узнать, как звезды рождаются, как они выглядят в «зрелые годы» и что с ними происходит, когда они «умирают».

Прежде чем приступить к решению проблемы жизненного цикла звезд, астроному необходимо выяснить еще одно обстоятельство: нужно узнать, сколько вещества содержится в звезде, т. е. чему равны массы звезд.

Как это ни кажется странным, почти половина звезд, наблюдаемых на небе,– это не одиночные звезды, как наше Солнце. Обычно это пары звезд, обращающихся вокруг общего центра масс (подобно тому, как Земля и Луна обращаются друг относительно друга). Такие системы (рис. 6.4) называются *двойными звездами.* Двойные звезды представляют большую важность для астрономов, поскольку, наблюдая движение компонентов в двойной системе, можно точно определить массы этих звезд. Наблюдая, как две звезды движутся около общего центра масс, астроном может с помощью ньютоновской механики вычислить, какими массами обладают эти звезды. Таким путем астрономия получает данные о количестве вещества, содержащегося в звездах.

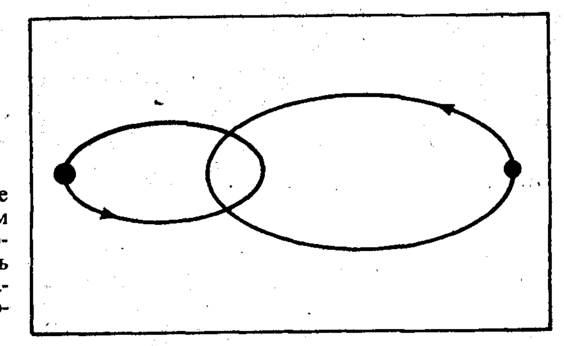


РИС. 6.4.
Двойная звезда. Многие звезды, которые мы видим на небе, на самом деле состоят из двух звезд, очень близких друг к другу и обращающихся по орбитам вокруг общего центра масс.

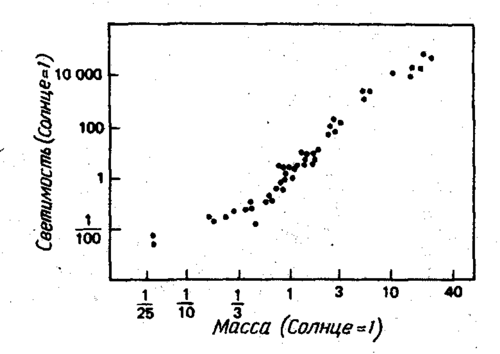


РИС. 6.5.

Соотношение масса–светимость. Массы и светимости звезд главной последовательности связаны между собой так, как это видно из графика. Слабые звезды обладают самыми малыми массами (1/10 массы Солнца или даже меньше), а наиболее яркие звезды – самые массивные (до 50 масс Солнца).

Данные об измерениях масс для многих двойных систем удобнее всего представить в форме графика (рис. 6.5). Оказывается, самые слабые звезды вместе с тем и наименее массивные. Обычно такие звезды имеют раз в десять меньшие массы, чем Солнце. С другой стороны, звезды с наибольшей светимостью – самые массивные; известны звезды с массами в 40 и даже 50 солнечных. Эта связь между массой и светимостью для звезд главной последовательности называется *соотношением масса – светимость.*

Зная светимости, температуры и массы ряда звезд, астрономы могут поставить перед астрофизиками задачу – выяснить, что происходит в звездах. Почему звезды группируются в три основные типа на диаграмме Герцшпрунга – Рассела? Почему самые массивные звезды одновременно обладают наибольшими светимостями? Как связаны красные гиганты со звездами главной последовательности? Имеют ли красные гиганты какое-либо отношение к белым карликам? Или они связаны с какими-то другими объектами? Астрофизик должен воспользоваться законами физики, использовать методы математики, учесть результаты астрономических наблюдений и ввести все эти данные в хорошую ЭВМ. Через несколько минут (иногда – часов) ЭВМ выразит на языке чисел то, что природа реализует в небесах за миллиарды лет. Полученный результат – это увлекательный рассказ об *эволюции звезд.*

Наблюдая небо, астрономы часто обнаруживают огромные облака газа. Прекрасный пример – туманность Ориона (иногда ее называют «М 42»), которую с трудом можно рассмотреть невооруженным глазом близ средней звезды в «мече» Ориона. Прекрасная фотография этой туманности приведена на рис. 6.6.

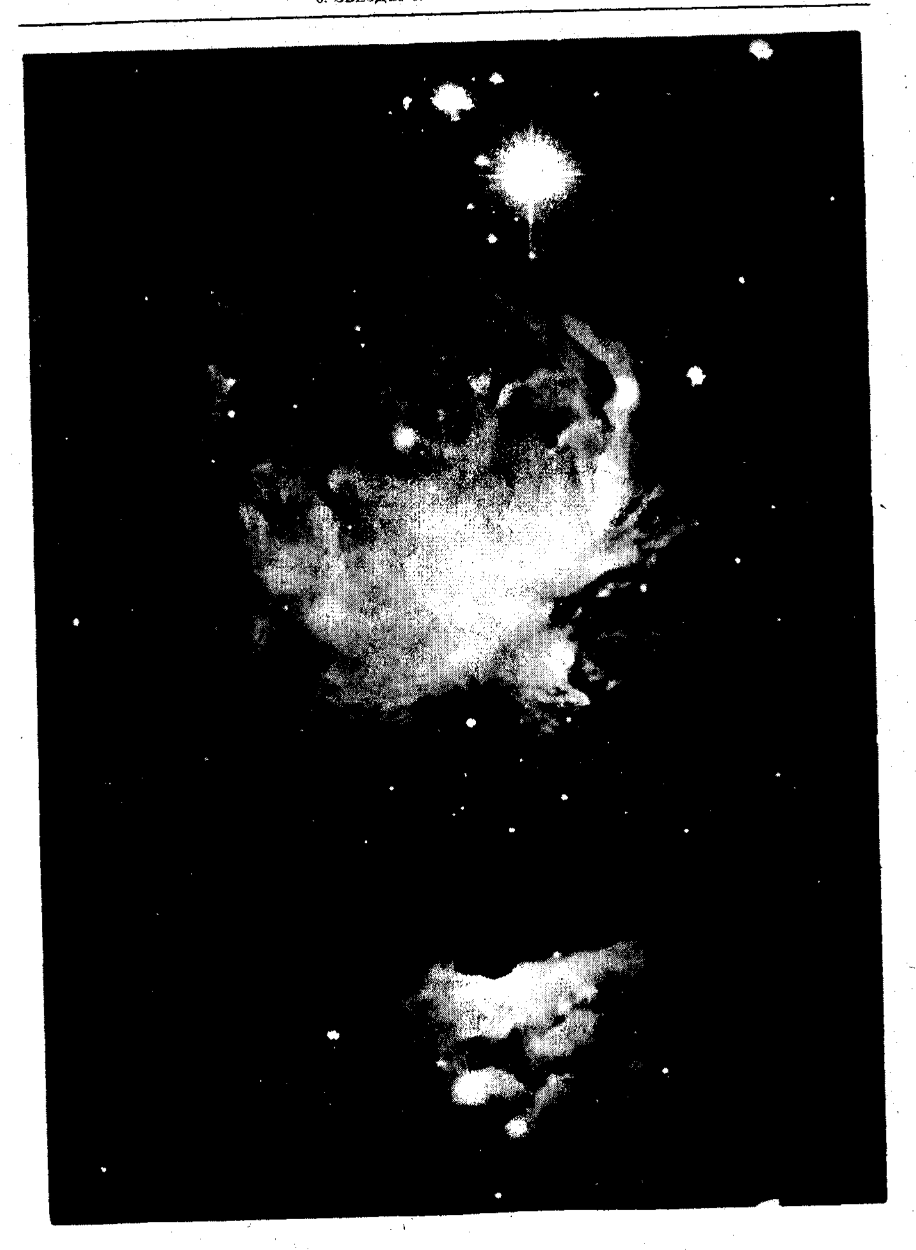


РИС. 6.6.

Туманность Ориона. Именно здесь, в гигантских облаках холодного газа (например, в туманности Ориона, изображенной на этом снимке), рождаются звезды. (Ликская обсерватория.)

Обратите внимание на несколько темных участков в этой туманности. Это не «дыры» в ней, как думали еще в XIX в., а холодные темные облака пыли, заслоняющие от нас светящиеся скопления газа, находящиеся позади.

Представим себе одно из этих холодных и темных облаков газа и пыли. Можно ожидать, что оно не вполне однородно, а содержит сгущения, в которых газ несколько плотнее, чем в соседних частях облака. Поскольку такое сгущение содержит больше вещества, чем его окружение, оно создает и немного более сильное поле тяготения; значит, оно будет притягивать окружающее его вещество. В результате сгущение будет становиться все массивнее и порождать все более сильное гравитационное поле, в свою очередь притягивающее еще больше вещества. Путем такой *аккреции* сгущение растет как по размерам, так и по массе, пока в нем не скопится, наконец, огромное количество вещества – во много масс Солнца, – распределенное в объеме, многократно превышающем размеры Солнечной системы.

Подробные расчеты астрофизиков показывают, что такая *протозвезда* неустойчива. Дело в том, что отсутствует какое-либо сопротивление огромному весу миллиардов и миллиардов тонн газа. Поэтому протозвезда начинает сжиматься. По мере того как вещество этого огромного газового шара занимает все меньший и меньший объем, начинают резко возрастать давление и плотность внутри протозвезды. Когда вы потираете руки, ваши ладони нагреваются. По той же, по сути дела, причине температура вблизи центра протозвезды при ее сжатии повышается все сильнее и сильнее. Наконец, когда температура в центре достигает около 10 миллионов градусов, ядра атомов водорода начинают сталкиваться с такой силой, что они *сливаются*, образуя ядра атомов гелия. При такой *термоядерной реакции*, при которой водород превращается в гелий, выделяется гигантское количество энергии. Это тот же процесс, который происходит в водородной бомбе. Мощный процесс выделения энергии оказывается способным остановить сжатие. Вот так родилась звезда!

В процессе сжатия протозвезды точка, изображающая ее на диаграмме Герцшпрунга – Рассела, очень быстро перемещается по диаграмме, поскольку быстро изменяются условия на поверхности протозвезды. Сначала по мере уменьшения размеров протозвезды ее светимость падает. Затем, непосредственно перед «зажиганием» термоядерной реакции, поверхностная температура протозвезды быстро возрастает. Согласно расчетам астрофизиков, эта точка-звезда на диаграмме Герцшпрунга – Рассела останавливается, когда в сердцевине звезды начинается «сжигание» водорода, причем эта точка остановки соответствует *главной последовательности*. На рис. 6.7 вы видите прекрасный пример молодого звездного скопления.

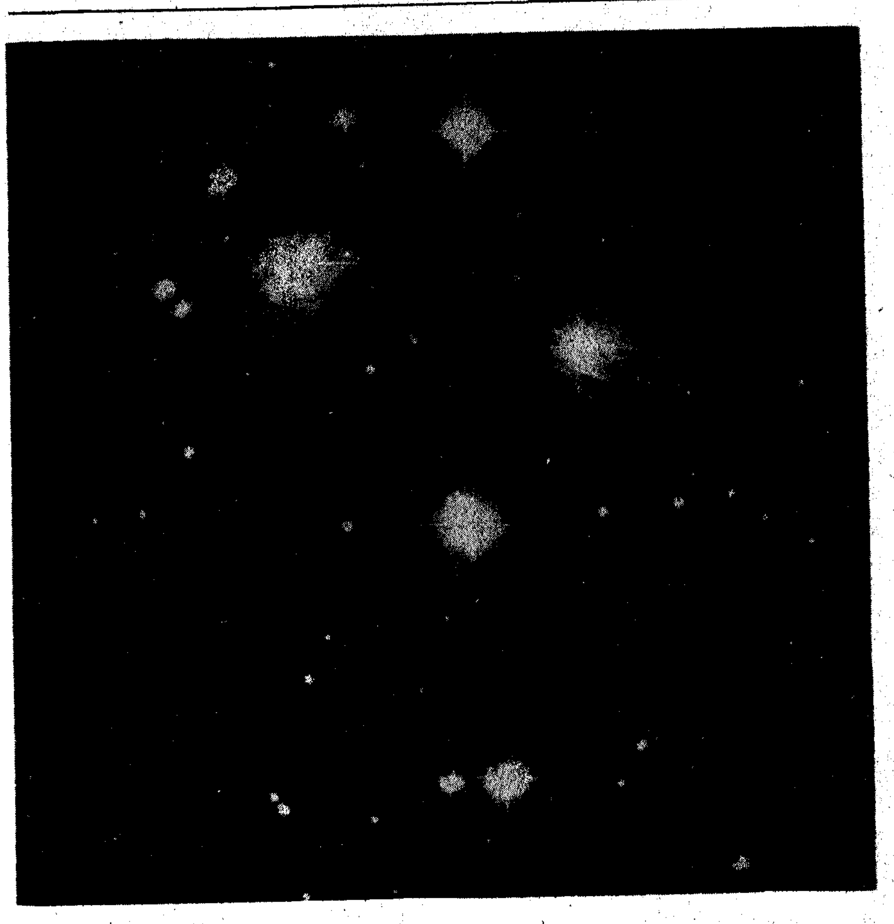


РИС. 6.7.
Плеяды. Группа очень молодых звезд. Термоядерная реакция включилась в недрах этих звезд недавно – какой-нибудь миллиард лет назад. (Ликская обсерватория.)

Таким путем астрофизикам удалось вскрыть истинный смысл главной последовательности. В центральной области каждой звезды главной последовательности происходит «сжигание» водорода. Такое «сжигание» в массивных звездах происходит с огромной скоростью. Поэтому более массивные звезды являются и самыми яркими. У звезд малой массы «сжигание» водорода происходит намного медленнее, и поэтому менее массивные звезды оказываются самыми слабыми.

Солнце – типичный пример звезды главной последовательности, и в нем за каждую секунду превращается в гелий 600 миллио-

нов тонн водорода. Это могло бы показаться невероятно быстрым темпом, если бы в центральных областях Солнца не было так много водорода, что оно способно выдерживать такой темп в течение по меньшей мере десяти миллиардов лет. Все это время точка, изображающая Солнце на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, остается в средней части главной последовательности. За весь этот срок Солнце или другая звезда подобного типа изменится очень мало. Солнцу сейчас около 5 миллиардов лет, так что у нас есть в запасе по крайней мере еще 5 миллиардов лет.

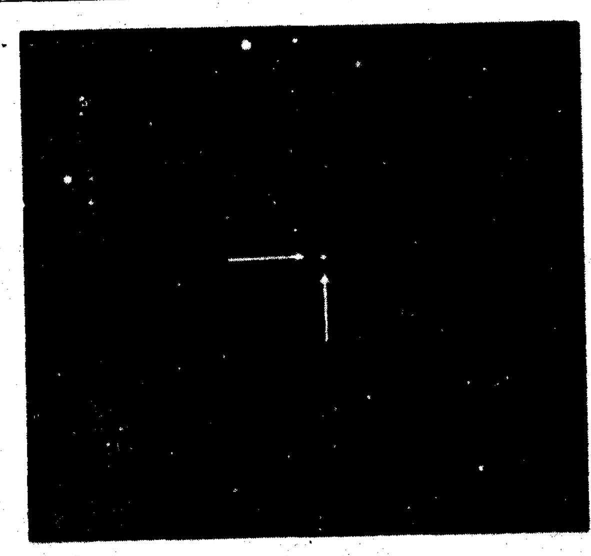
В конце концов в центре звезды главной последовательности весь водород кончится. Истощение запасов водорода приводит к большим переменам. Вспомним, что включение «сжигания» водорода привело к остановке первоначального сжатия протозвезды. Поэтому, как только «сжигание» водорода выключается, центральная область звезды начинает сжиматься – ведь опять нет ничего, что бы ее сдерживало. При сжатии снова начинают стремительно нарастать давление, плотность и температура. Наконец, когда температура в центре звезды достигнет 100 миллионов градусов, ядра атомов гелия (накопившихся на стадии «сжигания» водорода) станут при соударениях сливаться друг с другом и давать ядра углерода. Такое включение «сжигания» гелия в сердцевине звезды приводит к огромному дополнительному выделению энергии. К тому же выделение энергии в звезде в ходе сжатия центральной области как бы раздувает ее поверхность во всех направлениях. Звезда расширяется, а газы ее атмосферы охлаждаются до 3000–4000 К. Получается гигантская звезда с диаметром в треть миллиарда километров и с низкой температурой поверхности – красный гигант!

Примерно через 5 миллиардов лет истощатся все запасы водорода в недрах Солнца. Центральная область начнет стремительно сжиматься, а поверхность Солнца расширяться: включится «сжигание» гелия. В сравнительно короткие сроки (менее чем за миллиард лет) чудовищно вздувшееся Солнце поглотит Землю, и наша планета превратится в пар.

Но так же, как истощился в свое время водород, настанет черед и для гелия. Последует еще одно стремительное сжатие сердцевины звезды, и если она раньше была гораздо массивнее нашего Солнца, то произойдет включение еще более экзотических термоядерных реакций – таких, как «сжигание» углерода, кислорода и кремния. Именно в ходе таких процессов в массивных звездах рождаются тяжелые элементы.

Хотя мы пока понимаем не все, что происходит, обычно считается, что на поздних этапах эволюции звезды становятся чрезвычайно неустойчивыми (рис. 6.8). Эти звезды могут, например, колебаться, пульсируя как по объему, так и по светимости.

В конце концов неустойчивость массивной звезды, прибли-



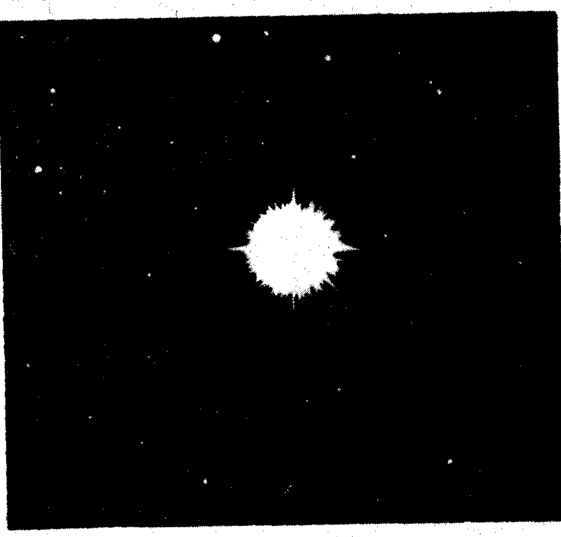


РИС. 6.8.
Новая звезда. Весной 1934 г. в созвездии Геркулеса взорвалась звезда. Это одно из катастрофических событий, которые происходят со звездами в двойных системах, когда они приближаются к концу своей эволюции. (Ликская обсерватория.)

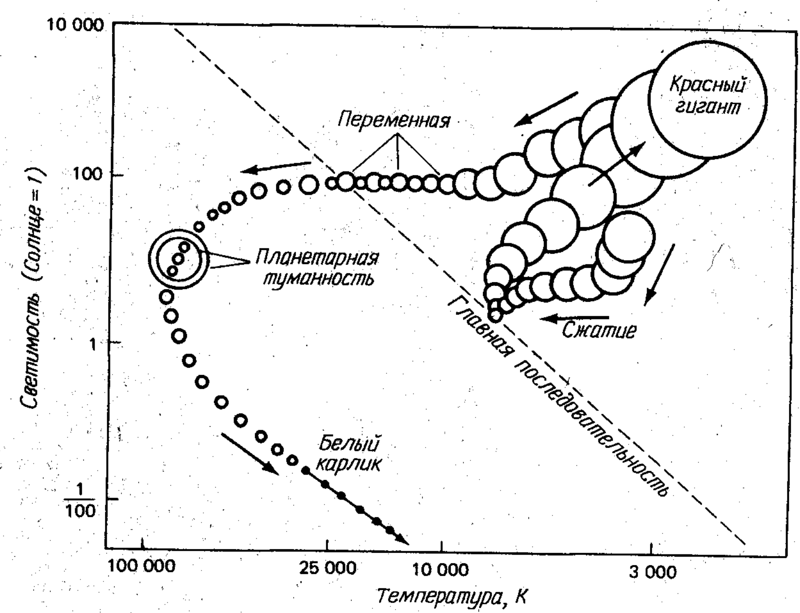


РИС. 6.11.

Эволюция звезды. Весь цикл жизни звезды типа Солнца можно изобразить как движение точки по диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Эта точка сначала останавливается на долгое время на главной последовательности, а затем в области красных гигантов и заканчивает свой путь в области белых карликов. Этапы перехода из одной области в другую проходятся очень быстро.

возникает неустойчивость, и точка вновь начинает быстро двигаться через диаграмму Герцшпрунга–Рассела, и, хотя этот эволюционный путь во всех подробностях еще неясен (звезда изменяется так быстро, что ЭВМ не поспевает за ней в своих вычислениях), известно, что все кончается на белом карлике. Белые карлики–это *умершие звезды.* Они слабо светят в космосе и остывают, как остывает чашка кофе, забытая на кухонном столе. По мере остывания белые карлики становятся все слабее и слабее. Точка, изображающая белый карлик, медленно сползает по кривой остывания вниз и вправо по диаграмме.

Следует подчеркнуть несколько важных фактов, относящихся к звездной эволюции. Прежде всего самые массивные звезды главной последовательности–это вместе с тем и самые яркие. Они яркие потому, что водород в них «сжигается» в бешеном темпе. Несмотря на большую массу и соответственно огромные запасы горючего, водород в сердцевине таких звезд истощается очень скоро. Иными словами, самые массивные звезды и эволюционируют быстрее всего.

Во-вторых, исследование планетарных туманностей и остатков сверхновых наводит нас на мысль, что самые массивные звезды могут выбрасывать в космос часть своего вещества (но, вероятно, не все), так что сохраняются лишь «останки» звезды.

Наконец, как обсуждается в следующей главе, астрофизики твердо уверены в существовании четкого верхнего предела массы белого карлика. Белый карлик должен иметь массу, меньшую 1,25 массы Солнца.

Итак, перед нами встает явно нелегкая задача. Представьте себе массивную звезду типа Ригеля в созвездии Ориона. Звезда этого типа обладает массой в 40 масс Солнца и поэтому эволюционирует очень быстро. Но для того, чтобы стать белым карликом, она должна выбросить в космос почти 39 солнечных масс вещества. Насколько можно судить по тому, что знают астрономы о планетарных туманностях и остатках взрывов сверхновых, это слишком большая доля.

До середины 1960-х годов было общепринятым думать, что даже самые массивные звезды ухитряются каким-то путем сбросить достаточное количество вещества, чтобы спуститься пониже критического предела масс белых карликов. Но к концу 1960-х годов радиоастрономы сделали ряд замечательных открытий, серьезно поколебавших эту распространенную точку зрения. Ростки этих сомнений дали плоды: в начале 1970-х годов астрофизики начали всерьез рассматривать возможность существования самых поразительных объектов, когда-либо пришедших в голову человеку. Речь идет о черных дырах.

7

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ ПУЛЬСАРЫ И НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Одним из решающих прорывов в понимании природы света послужила в середине XIX в. формулировка Максвеллом электромагнитной теории. Как говорилось в гл. 2, теория Максвелла привела к фундаментальному волновому уравнению, которое дает полную картину всех волновых свойств света. Замечательно, что это волновое уравнение не накладывает никаких ограничений на допустимые длины волн электромагнитного излучения. Заметим, что видимый свет, доступный нашему глазу, ограничен узким диапазоном длин волн – примерно от $7{,}7 \cdot 10^{-5}$ см для красного света и до $4{,}55 \cdot 10^{-5}$ см для фиолетового. Иными словами, согласно теории Максвелла, должны существовать и другие типы электромагнитного излучения, обладающие как намного более длинными, так и намного более короткими длинами волн, чем видимый свет. В этом смысле теория электромагнетизма действительно предсказала существование рентгеновских лучей, гамма-лучей, радиоволн, а также и ультрафиолетового и инфракрасного излучения.

Такое открытие должно было обеспокоить астрономов. Ведь практически все наши знания о Вселенной были почерпнуты из оптических наблюдений с помощью видимого света, а этот последний, оказывается, занимает лишь очень малую часть спектра всего электромагнитного излучения (см. рис. 2.5)! Почему бы звездам и галактикам не испускать и другие типы излучения, кроме видимого света,– например, рентгеновские лучи или радиоволны? Поскольку глаз человека этих излучений не воспринимает, астрономы – и это стало им ясно – упускали огромное количество ценнейшей информации.

Существуют два типа трудностей наблюдения неба в диапазонах радиоволн, очень далеких от видимого света. Во-первых, до самого недавнего времени ученые просто не знали, как строить инструменты, способные принимать экзотические виды электромагнитного излучения. И глаз человека, и фотопленка здесь были совершенно бесполезны. Во-вторых, земная атмосфера непрозрачна для большей части электромагнитного спектра. Например, рентгеновские и ультрафиолетовые лучи попросту не

проникают сквозь толщу воздуха, окружающего поверхность Земли.

Такая непрозрачность земной атмосферы – одновременно и зло, и благо. Жизнь смогла развиться на поверхности нашей планеты именно благодаря тому, что атмосфера защищает ее от разнообразных смертоносных излучений, приходящих из космоса. Однако на определенных длинах волн совершенно невозможно производить наблюдения неба с поверхности Земли, так как соответствующие виды излучения не доходят до нее сквозь воздушную толщу. Пытаться увидеть с поверхности Земли рентгеновские или ультрафиолетовые лучи, приходящие с неба,– это все равно что пытаться смотреть сквозь кирпичную стену. Атмосфера защищает нас, но она же лишает нас информации.

Эти доводы позволяют нам по достоинству оценить важность усилий Карла Янского, который в 1931 г. первым принял радиоволны из космоса. Он проводил эксперименты с антеннами в лабораториях фирмы «Белл» и обнаружил, что они принимают радиоволны, приходящие от внеземных источников. Радиоволны определенных длин волн, как и видимый свет, проникают сквозь земную атмосферу.

Вторая мировая война оказала значительное воздействие на обширный круг научных исследований, включая и работы в такой новой области, как радиоастрономия. В результате достижений электроники и радиотехники астрономы в конце 1940-х годов смогли приступить к строительству радиотелескопов. На протяжении 1950-х годов во всем мире было создано множество таких телескопов, и для науки открылась возможность увидеть небо в новом «свете» – в радиоволнах.

Создание радиотелескопов (рис. 7.1) как бы дало нам второе зрение для наблюдения Вселенной. Ученые впервые смогли увидеть Вселенную в диапазонах длин волн, весьма далеких от видимой части спектра электромагнитного излучения.

1950-е годы были в основном посвящены подробному картографированию неба в радиоволнах (рис. 7.2). Радиоастрономы посвятили многие годы составлению каталогов открытых источников космического радиоизлучения. Теперь в каких каталогах значатся тысячи объектов. Но к 1960-м годам радиоастрономам пришлось выкроить время для подробного исследования ряда удивительных радиоисточников, которые они обнаружили.

В конце 1967 г. группа радиоастрономов во главе с Энтони Хьюишем из Кембриджского университета в ходе своих наблюдений обнаружила, что их радиотелескоп принимает совершенно необычные сигналы, а именно короткие импульсы радиошумов, следующие один за другим с интервалами примерно в 1 с (см. рис. 7.3).

Сначала посчитали, что это были сигналы от запущенного

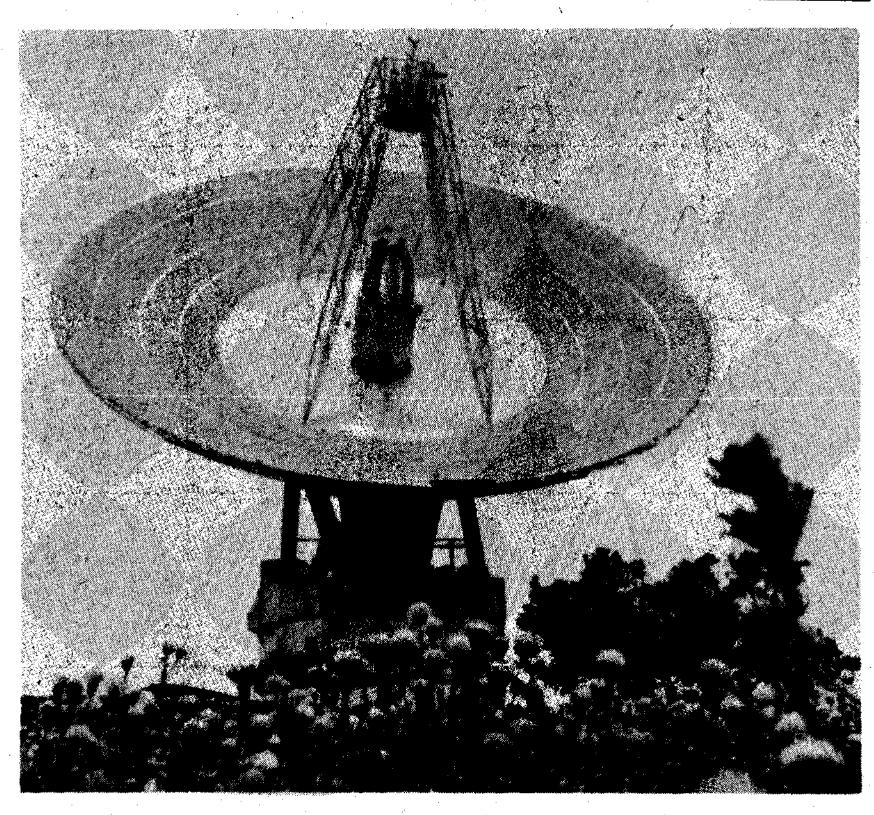
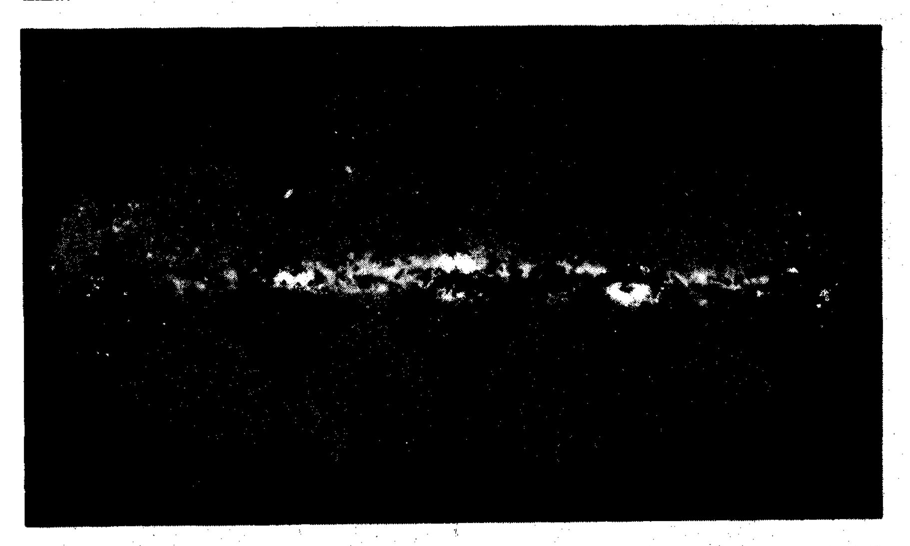


РИС. 7.1.
Радиотелескоп. Радиотелескоп – это огромная металлическая тарелка, которая фокусирует, собирает и усиливает радиоволны, приходящие из космического пространства. (НАСА; Лаборатория реактивного движения.)

кем-то спутника, однако вскоре стало ясно, что приписать их работе искусственного космического корабля невозможно. Корабль, запущенный в Солнечной системе, медленно двигался бы на фоне звезд, находясь на околосолнечной орбите. Но таинственный импульсный радиоисточник был неподвижен относительно звезд – значит, он должен был находиться очень далеко от нас – там же, где сами звезды!

Дальнейшие наблюдения привели к удивительному открытию: импульсы от этого радиоисточника были чрезвычайно регулярными и точными. Хотя одни импульсы были слабее, а другие – сильнее, их время прихода выдерживалось с поразительной степенью точности. Еще никогда в природе не наблюдалось процесса, который мог бы соперничать с этими импульсами по своей регулярности и точности. Сразу же стали подозревать, что



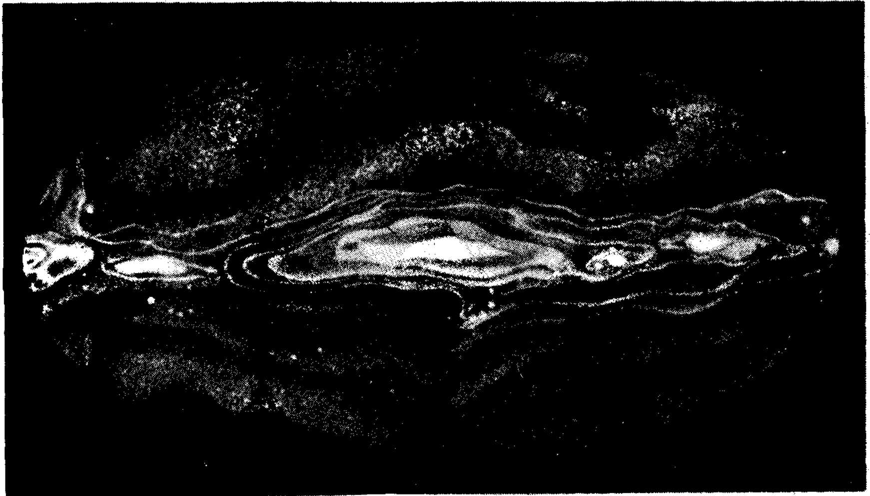


РИС. 7.2.
Небо в видимом свете и в радиодиапазоне. На верхнем рисунке изображено все видимое небо. Рисунок ориентирован так, чтобы Млечный Путь проходил через него горизонтально. На нижнем рисунке изображен вид неба в радиоволнах. (Ликская обсерватория; Гриффитская обсерватория.)

наконец-то удалось принять сигналы от внеземной цивилизации. Сторонники теории о «маленьких зеленых человечках» ухватились за идею о том, что новооткрытый радиоисточник может служить радионавигационным маяком для летающих тарелок.

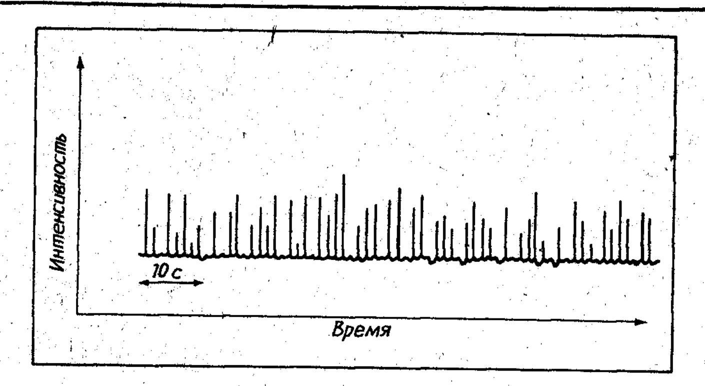


РИС. 7.3.

Запись излучения типичного пульсара. Импульсы радиоизлучения пульсара иногда бывают сильными, а иногда – слабыми. Но время их появления всегда выдерживается с поразительной точностью.

К весне 1968 г. было открыто еще три пульсирующих радиоисточника (*пульсара*). Первый пульсар получил название СР 1919, остальные три – СР 0834, СР 0950 и СР 1133. (Буквы СР означают «Кембридж, пульсар», а цифры – приблизительные небесные координаты пульсара.) Во всех случаях периоды пульсаций были чрезвычайно правильными. Сейчас радиоастрономам известно около 100 пульсаров. Их периоды равны от 1/30 с для самого быстро пульсирующего до более чем 3 с для самого медленного.

Вместо того чтобы объяснить свои открытия с привлечением маленьких зеленых человечков, ученые предпочитают опираться на свои знания о Вселенной и стремятся истолковать наблюдения в рамках действия известных законов природы. И вот весной 1968 г. астрофизики всего мира приступили к кропотливому пересмотру накопленных знаний о звездах, чтобы найти рациональное и естественное объяснение природы пульсаров.

Вспомним, что говорилось в предыдущей главе о термоядерных реакциях в центральных областях звезд, приводящих к высвобождению гигантской энергии и возникновению высоких температур, достаточных, чтобы поддерживать внешние слои звезд. К концу жизни звезды, когда истощится все содержащееся в ней ядерное горючее, звезда прекращает свое существование на одном из нескольких путей. Звезда малой массы просто сжимается и становится белым карликом, возможно выбросив часть своего вещества. Звезда средней массы также может превратиться в белого карлика, правда выбросив более значительную часть своего вещества, возможно, с образованием при этом планетарной туманности. Самые же массивные звезды могут заканчивать жизнь грандиозным взрывом – мы называем это вспышкой сверхновой. При этом значительная доля вещества

умирающей звезды может быть стремительно выброшена в космос.

Природа белых карликов как «мертвых» звезд стала достаточно ясна после пионерской работы С. Чандрасекара в начале 1930-х годов. Та термоядерная «печь», которая поддерживает структуру обычных звезд, не может быть причиной устойчивости внешних слоев в белых карликах просто потому, что в них уже исчерпано все горючее. Для понимания того, что же поддерживает структуру белого карлика, рассмотрим вещество в сердцевине коллапсирующей, умирающей звезды. По мере сжатия звезды давления и плотности становятся столь велики, что все атомы полностью «раздавливаются». В результате получается море свободных электронов, в котором как бы «плавают» ядра. Электроны обладают *спином*, или собственным «вращением», вследствие чего их поведение подчиняется важному закону природы, называемому в физике *принципом запрета Паули*. Согласно этому запрету, два электрона одновременно не могут занимать одно и то же место, если их скорости и спины одинаковы. По мере сжатия умирающей звезды электроны подвергаются давлению до такой степени, что в конце концов оказываются заполненными все вакансии возможного расположения и скоростей электронов. Как только это произошло, электроны начинают с большой силой действовать друг на друга, сопротивляясь дальнейшему сжатию умирающей звезды. Таким образом возникает *давление вырожденных электронов*, предотвращающее неограниченное сжатие (коллапс) белого карлика.

Белые карлики известны астрономам уже на протяжении многих лет. Эти звезды настолько обычны, что до недавних пор все считали их конечным состоянием всех умирающих звезд. Прекрасный пример одной из таких мертвых звезд показан на рис. 7.4 – это спутник звезды Сириус в созвездии Большого Пса.

Выполнив подробные расчеты структуры белых карликов, Чандрасекар пришел к интересному открытию: для массы белого карлика существует строгая верхняя граница. Давление вырожденных электронов способно поддерживать вещество мертвой звезды *лишь* в том случае, *если* ее масса *не превышает* примерно 1,25 массы Солнца. Если же масса умирающей звезды существенно больше 1,25 солнечной, то даже мощных сил между вырожденными электронами недостаточно для того, чтобы противостоять всесокрушающему давлению вышележащих слоев звезды. Этот критический предел массы – около 1,25 массы Солнца – называется *пределом Чандрасекара*.

Так как белые карлики весьма обычны и так как не было известно других типов «мертвых» звезд, то астрономы полагали, что все умирающие звезды ухитряются так или иначе сбросить достаточное количество вещества, чтобы их массы оказались

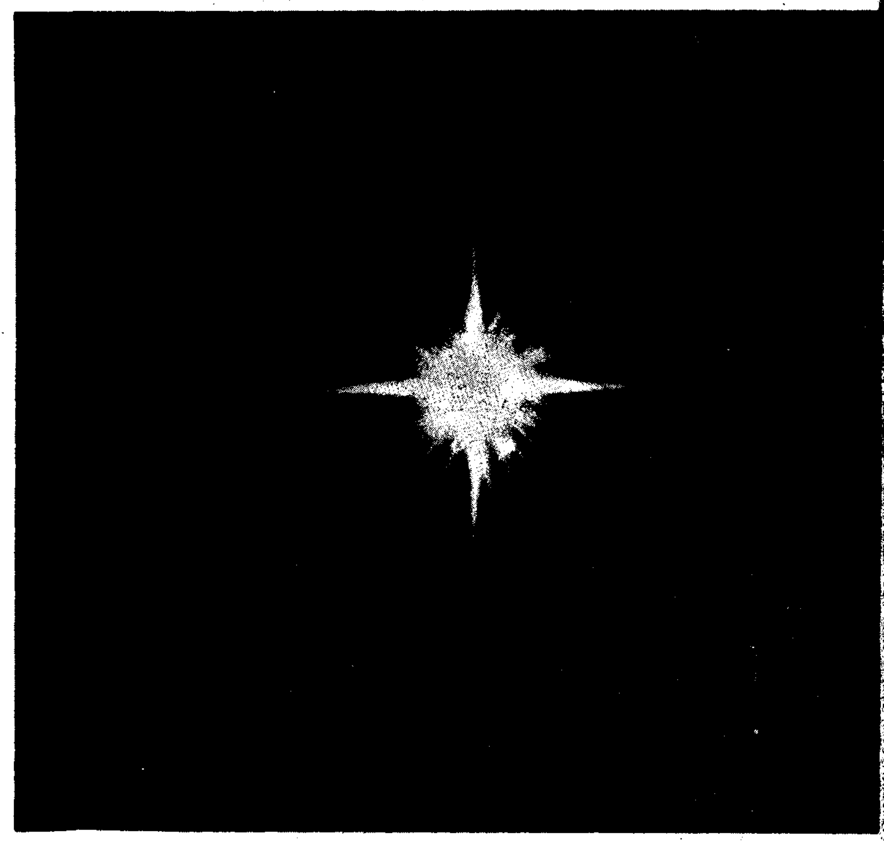


РИС. 7.4.
Белый карлик. У Сириуса, самой яркой звезды неба, есть спутник – белый карлик. Белые карлики типа того, который наблюдается рядом с Сириусом,– это горячие, слабые и очень маленькие по размерам звезды.

меньше предела Чандрасекара. Однако это широко распространенное мнение не удовлетворило нескольких астрофизиков – они стали строить гипотезы о том, что же может случиться с умирающей звездой, если ее масса превышает 1,25 солнечной.

В 1934 г. В. Бааде и Ф. Цвикки выяснили, что могло бы происходить с мертвыми звездами, масса которых составляет от 1,5 до 2 масс Солнца. Так как давление вырожденных электронов недостаточно сильно, чтобы остановить сжатие, звезда попросту становится все меньше и меньше. Давления и плотности растут, пока электроны не вдавятся внутрь атомных ядер, из которых состоит звезда. В результате отрицательно заряженные электроны соединятся с положительно заряженными протонами



РИС. 7.5.
Крабовидная туманность. Пульсар NP 0532 расположен в центре этого остатка взрыва сверхновой. (Ликская обсерватория.)

и дадут нейтроны. Когда, наконец, вся звезда почти целиком превратится в нейтроны, снова начнет играть важную роль принцип запрета Паули. Силы между нейтронами вызовут появление *давления вырожденных нейтронов*. Это новое, еще более могучее давление способно остановить сжатие и ведет к появлению звездного тела нового типа – *нейтронной звезды*.

Еще через пять лет, в 1939 г., Ю. Р. Оппенгеймер и Г. Волков опубликовали обширные вычисления, доказывающие плодотворность этих соображений. Но так как никто никогда не наблюдал нейтронных звезд, эти пророческие идеи не нашли подходящей почвы. По сути дела астрономы просто не знали, где и как им искать нейтронные звезды.

В 1054 г. н. э. астрономы Древнего Китая отметили появление на небе «звезды-гостьи» в созвездии Тельца. Яркость этой новой звезды была столь велика, что ее можно было видеть без труда в солнечный день. Затем она стала ослабевать и вскоре совершенно пропала из виду.

Когда современные астрономы направили свои телескопы на то место неба, где, согласно древним записям, появилась «звезда-гостья», они обнаружили великолепную Крабовидную туманность (рис. 7.5). Крабовидная туманность является прекрасным примером остатка взрыва сверхновой, а древнекитайским астрономам настолько повезло, что они увидели умирающую звезду, когда она сбрасывала свою атмосферу.

В конце 1968 г. астрономов ждала новая радость: был обнаружен пульсар, расположенный точно посередине Крабовидной туманности. Этот пульсар, известный как NP 0532, – самый быстро пульсирующий из всех пульсаров. Импульсы радиоизлучения приходят от него по 30 раз за секунду. Это открытие дало астрономам повод для подозрений, что умирающие звезды могут иметь какое-то отношение к пульсарам. Непосредственные расчеты показали, что белые карлики неспособны давать тридцать импульсов радиошума в секунду. Пришла пора воскресить идеи Бааде, Цвикки, Оппенгеймера и Волкова.

Все звезды вращаются – и все они, вероятно, обладают магнитными полями. В обычных условиях оба этих свойства довольно несущественны. Например, Солнце делает один оборот вокруг своей оси примерно за месяц. Его магнитное поле к тому же довольно слабое. В среднем у Солнца магнитное поле имеет приблизительно такую же напряженность, как и у Земли. Однако если Солнце или подобная ему звезда станет сжиматься до размеров нейтронной звезды, то оба указанных свойства приобретут исключительно важное значение. Чтобы понять причины этого, представим себе фигуристку, делающую пируэт на льду. На рис. 7.6 схематически показано, что, прижимая к себе руки, она увеличивает скорость вращения. Это – прямое следствие фун-

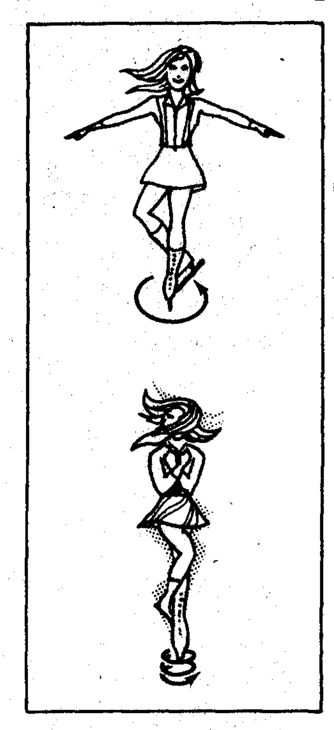


РИС. 7.6.
Закон сохранения момента количества движения. Делая пируэт, фигуристка прижимает к себе руки, и скорость ее вращения сразу увеличивается.

даментального закона физики, известного как *закон сохранения момента количества движения*. Подобным же образом если большая звезда, размером с Солнце, сжимается до малого объема, то скорость ее вращения стремительно возрастает. Поэтому астрономы считают, что нейтронные звезды очень быстро вращаются – вероятно, быстрее, чем оборот за секунду.

Когда звезда очень велика, ее магнитное поле распределено по многим миллионам квадратных километров ее поверхности. Поэтому напряженность магнитного поля во всех точках поверхности довольно невелика. Однако, умирая, звезда уменьшается в размерах. То магнитное поле, которое первоначально было распределено на большой площади, сосредоточивается на нескольких сотнях квадратных километров. При сокращении площади, занимаемой магнитным полем, его напряженность тоже стремительно возрастает. Если бы звезда вроде Солнца сжималась до размеров нейтронной звезды, то напряженность ее магнитного поля увеличилась бы примерно в миллиард раз!

Подводя итоги, можно сказать, что у астрономов, занимающихся проблемами нейтронных звезд, имеются веские основания считать, что эти звезды быстро вращаются вокруг оси и обладают мощными магнитными полями. К тому же они учитывают,

что ось вращения нейтронной звезды может быть *не параллельна* ее магнитной оси – ведь магнитная ось Земли наклонена по отношению к ее оси вращения, так что компас показывает не совсем точно на Северный географический полюс.

Основываясь на этих соображениях, можно нарисовать картинку (рис. 7.7), иллюстрирующую основные свойства нейтронной звезды. Сама нейтронная звезда очень мала – от 15 до 20 км в диаметре. Скорость ее вращения очень высока, а направление мощного магнитного поля наклонено к оси вращения.

Необходимо учесть, что, хотя в недрах нейтронной звезды содержатся почти исключительно нейтроны, на ее поверхности все же имеется множество заряженных частиц (протонов и электронов). При попадании этих заряженных частиц в области сильных магнитных полей у северного и южного магнитных полюсов звезды они ускоряются и поэтому сильно излучают электромагнитные волны. Иными словами, вследствие взаимодействия заряженных частиц с магнитным полем вблизи северного и южного магнитных полюсов нейтронной звезды должны испускаться мощные потоки электромагнитного излучения. Но так как звезда

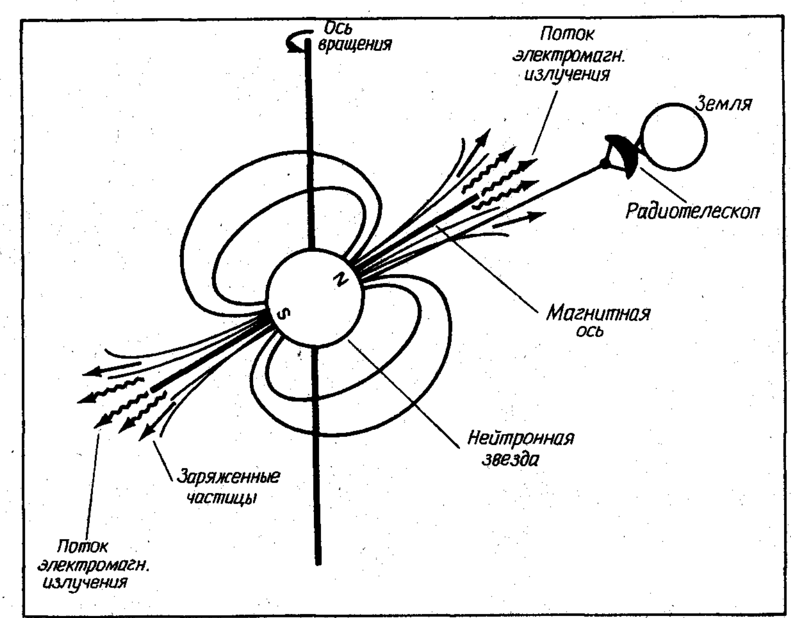


РИС. 7.7.
Строение нейтронной звезды. Астрономы считают, что нейтронные звезды очень быстро вращаются и обладают мощными магнитными полями. Основные свойства пульсаров, по-видимому, определяет излучение, исходящее из северного и южного магнитных полюсов.

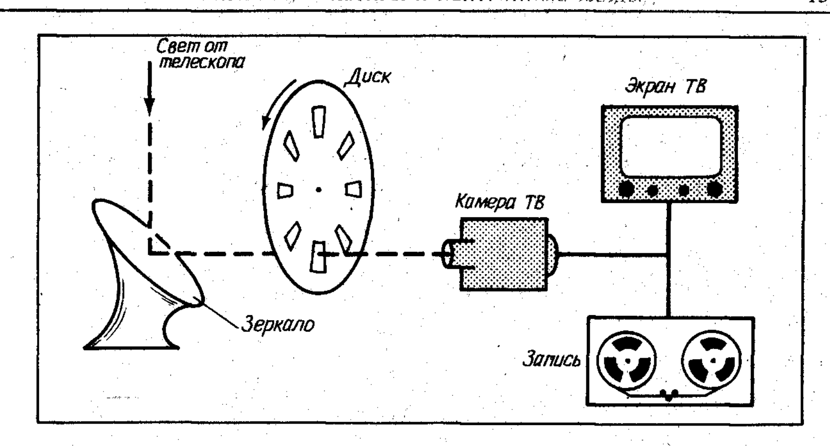


РИС. 7.8.
Телевизионная установка для наблюдения NP *0532.* Импульсы видимого света от пульсара в центре Крабовидной туманности были обнаружены с помощью телевизионной камеры и вращающегося диска с прорезями, который периодически перекрывал приходящий пучок света (с разными частотами).

в целом быстро вращается, то эти два пучка излучения должны кружить по небу. Если Земля окажется случайно на пути одного из этих пучков, то радиоастрономы зарегистрируют импульсы излучения всякий раз, когда пучок будет направлен по лучу зрения земного наблюдателя. В этом смысле нейтронная звезда работает как вращающийся луч маяка. Импульс излучения наблюдается всякий раз, когда пучок света идет по лучу зрения.

Все известные сейчас свойства пульсаров поддаются объяснению в рамках описанной модели нейтронной звезды – *наклонного ротатора.* И эта теория так хорошо соответствует данным наблюдений, что сейчас найдется мало астрономов, которые еще сомневаются в существовании нейтронных звезд. То, что когда-то считалось плодом чистой фантазии, оказывается, на самом деле существует в природе.

Но если пульсар проявляет себя как быстро вращающаяся нейтронная звезда, то естественно задаться вопросом: почему наблюдаются только импульсы *радиоволн*? Может быть, удастся обнаружить также пульсацию видимого света? Эта мысль пришла на ум группе астрономов обсерватории Китт Пик в конце 1968 г. Они направили свой телескоп на звезды в центре Крабовидной туманности и провели видеозапись их изображений с помощью телевизионной установки, показанной на рис. 7.8. Между телескопом и телекамерой они поместили вращающийся диск с прорезями. Вращая этот диск с разными скоростями, они могли прерывать входящий пучок света с разной частотой. Оказалось, что одна из звезд действительно гаснет и вспыхивает в диа-

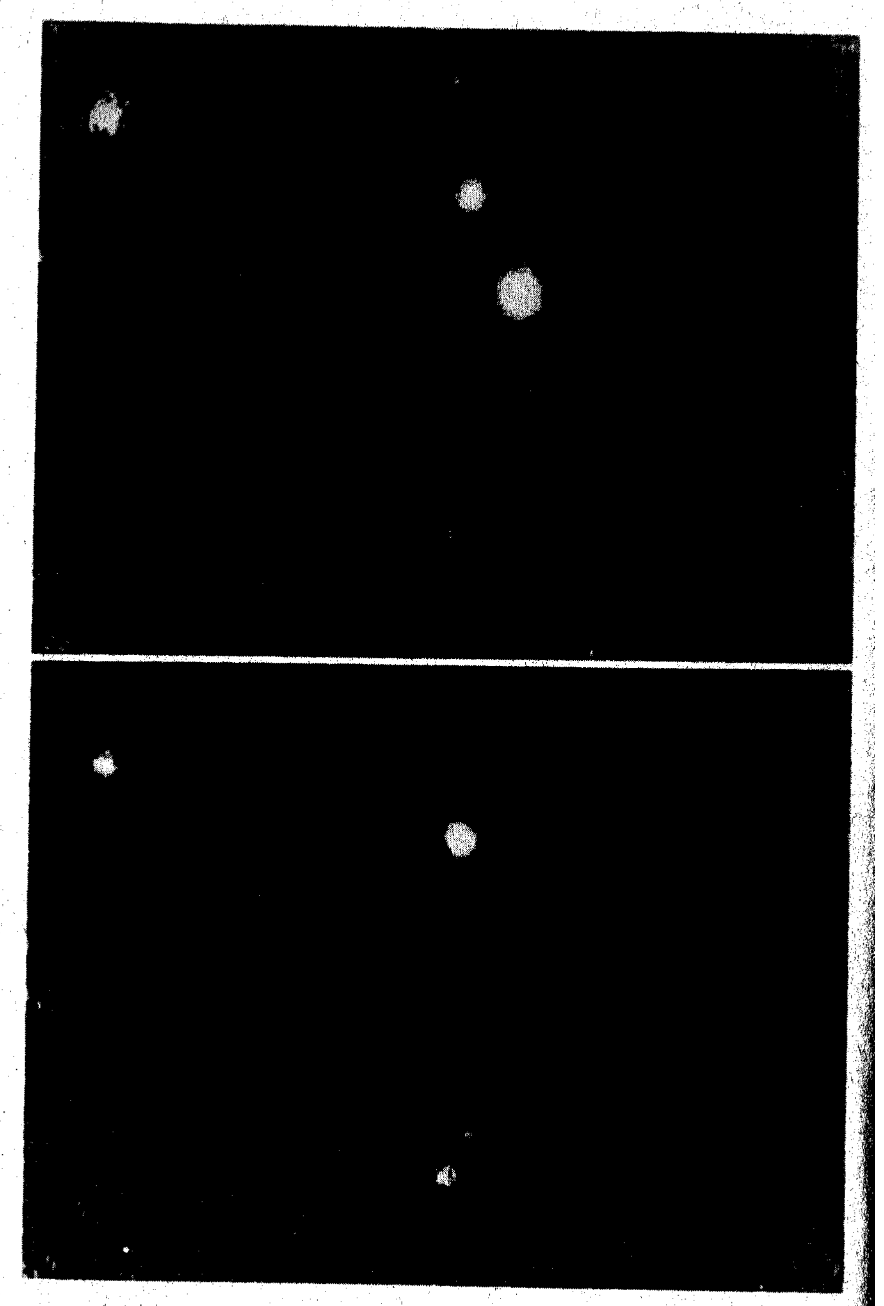


РИС. 7.9.
Пульсар NP *0532.* На этих двух телевизионных изображениях звезд в центре Крабовидной туманности пульсар NP 0532 виден сначала во время вспышки, а затем в перерыве между вспышками. (Ликская обсерватория.)

пазоне *видимого* света 30 раз в секунду. Однако, несмотря на упорные поиски, такие вспышки света удалось наблюдать только у пульсара Крабовидной туманности (NP 0532, рис. 7.9).

По мере того как объяснение пульсаров в качестве нейтронных звезд постепенно завоевывало общее признание, астрофизики стали все чаще обращаться к расчетам, касающимся природы «мертвых» звезд. В ЭВМ вводились в виде программ данные о физических законах и необходимых математических операциях; тем самым астрофизики ставили перед ЭВМ задачу рассчитать характерные черты структуры белых карликов и нейтронных звезд. На рис. 7.10 приводится взаимосвязь между массой и плотностью мертвых звезд. Устойчивым звездам, которые могут существовать в природе, соответствуют только два участка кривой, выданной ЭВМ. Из графика видно, что плотность в центре белого карлика составляет около 60 тонн на кубический сантиметр. Однако в центре нейтронной звезды плотность столь велика, что в кубическом сантиметре содержится около 2 миллиардов тонн вещества!

Кроме данных о взаимосвязи между массой и плотностью в недрах мертвой звезды, рис. 7.10 содержит еще один важный сюрприз. Вспомним, как важен предел Чандрасекара: белый карлик не может обладать массой, превышающей примерно 1,25 массы Солнца. Давление вырожденных электронов оказывается попросту недостаточно сильным, чтобы поддерживать больше

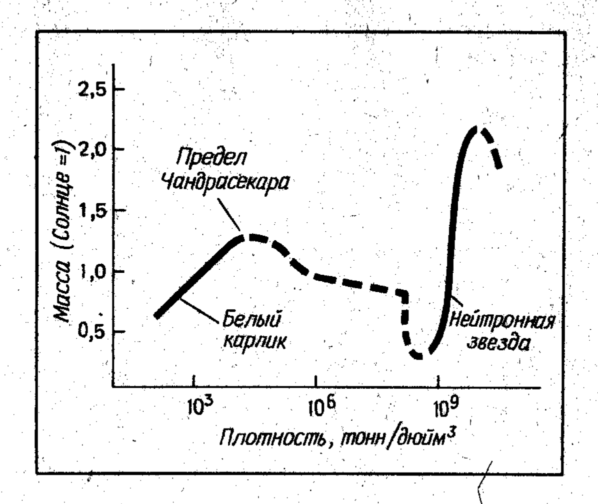


РИС. 7.10.
График зависимости массы от плотности для мертвых звезд. Плотность вещества белого карлика составляет около 60 т/см^3. В нейтронной звезде плотность равна примерно 2 миллиардам тонн на кубический сантиметр.

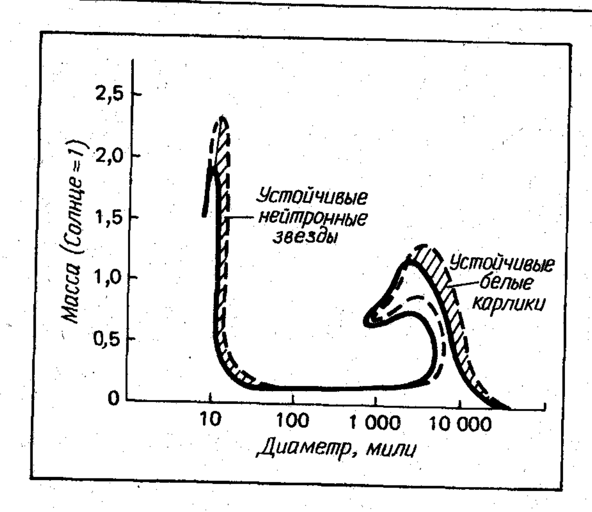


РИС. 7.11.

График зависимости массы от диаметра для мертвых звезд. Белые карлики обладают примерно такими же размерами, как Земля. Поперечник нейтронных звезд составляет всего 15–20 км.

чем 1,25 солнечной массы. Однако существует *также* верхний предел массы нейтронной звезды: не может существовать нейтронных звезд с массой более примерно 2,25 солнечной! Выше этого критического предела давление вырожденных нейтронов в свою очередь оказывается недостаточным, чтобы поддержать умирающую звезду.

На рис. 7.11 показана зависимость между массой и диаметром для мертвых звезд. Здесь тоже четко прослеживаются верхние пределы масс для белых карликов и нейтронных звезд. Можно думать, что при учете быстрого вращения эти верхние пределы должны значительно возрасти. Во вращающейся звезде атом испытывает наряду с направленной внутрь силой тяготения еще и центробежную силу, обусловленную вращением звезды и направленную наружу. На рис. 7.11 сплошная линия изображает зависимость для невращающейся мертвой звезды. Пунктиром здесь же дана кривая для мертвой звезды, вращающейся на пределе механической прочности. Устойчивые мертвые звезды соответствуют заштрихованной области между этими двумя предельными кривыми. Как и ожидалось, при наличии вращения предельные массы белых карликов и нейтронных звезд оказываются больше, но ненамного. В результате таких расчетов астрофизики пришли к убеждению, что *не может* существовать нейтронных звезд с массами, превышающими примерно три солнечные.

Существование верхнего предела массы нейтронной звезды

приводит нас к альтернативе. Наблюдения двойных звезд свидетельствуют о том, что во Вселенной существуют звезды с массами до 40 или 50 солнечных. Расчеты процессов эволюции звезд говорят о том, что массивные звезды стареют очень быстро. Предположим, что умирающая массивная звезда *не выбросит* все лишнее вещество в космическое пространство, вспыхнув как сверхновая. Пусть поэтому оставшаяся от звезды мертвая сердцевина обладает массой *более* трех солнечных масс. Такая звезда не может стать белым карликом, так как ее масса значительно превышает предел Чандрасекара. Такая звезда не может стать и пульсаром, ибо ее масса слишком велика, чтобы ее могло выдержать давление вырожденного нейтронного газа. Короче говоря, *физика не знает никаких сил, которые были бы способны поддерживать вещество этой звезды.* Умирающая звезда, мертвая сердцевина которой содержит вещества более трех солнечных масс, просто становится все меньше и меньше. Направленная внутрь всесокрушающая сила веса миллиардов миллиардов тонн вещества не может встретить достойного сопротивления. По мере сжатия звезды напряженность гравитационного поля вокруг нее становится все больше и больше. Теория Ньютона уже не может правильно описывать явления, и астрофизикам приходится обращаться к общей теории относительности Эйнштейна. В ходе продолжающегося сжатия нарастает искривление пространства-времени. Наконец, когда звезда сожмется до поперечника в несколько километров, пространство-время «свернется» и звезда исчезнет! А то, что останется, называется *черной дырой.*

Итак, звездные останки могут быть трех разновидностей: это белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Белые карлики известны уже много десятилетий. Они настолько обычны, что большинство астрономов считали их смертными останками любой звезды. Но затем были открыты пульсары, и теперь большинство астрономов признают и реальное существование нейтронных звезд. Основываясь на знании свойств мертвых звезд, астрономы начали с конца 1960-х – начала 1970-х годов думать о возможности существования самого удивительного типа мертвых звезд – черных дыр. Так открытие пульсаров возродило интересы к общей теории относительности. Почти полстолетия после того, как Эйнштейн опубликовал свои уравнения гравитационного поля, общая теория относительности как бы пребывала в спячке. Немногие исследователи могли представить себе что эта теория могла бы выдвинуться в физике на первый план. В 1939 г. Оппенгеймер и Снайдер опубликовали статью о том, что черные дыры могут существовать, но большинство отнеслись к ней как к фантазии. Однако пророческие работы Оппенгеймера теперь возродились, и многие астрономы верят, что черные дыры уже найдены среди объектов Вселенной.

8

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Еще в 1795 г. великий французский математик Пьер-Симон Лаплас теоретическим путем пришел к выводу, что свет не может уйти от тела, если оно достаточно массивно или достаточно сильно сжато. Даже из ньютоновской теории следует, что если скорость убегания для какого-либо объекта превышает величину скорости света, то этот объект для внешнего наблюдателя будет казаться абсолютно *черным*. Но на протяжении почти двухсот лет никому не приходило в голову, что в природе могут действительно существовать *черные дыры*. Однако к середине 1960-х годов астрофизикам удалось рассчитать подробно структуру звезд и ход их эволюции. Теперь, зная больше, астрономы отчетливо понимают, что не может существовать устойчивых мертвых звезд, масса которых превышала бы три солнечные массы. Поскольку во Вселенной звезды, обладающие намного бо́льшими массами,– широко распространенное явление, астрофизики стали всерьез обсуждать возможность существования черных дыр, рассеянных повсюду во Вселенной.

Как мы узнали из предыдущей главы, черная дыра – это один из трех возможных вариантов конечной стадии эволюции звезд. Однако в отличие от белых карликов и нейтронных звезд черная дыра – это пустое место. Это то, что остается после катастрофического гравитационного коллапса массивной звезды, когда она умирает. При коллапсе – катастрофическом сжатии звезды – напряженность силы тяготения над ее поверхностью становится настолько чудовищно большой, что окружающее звезду пространство-время свертывается, и звезда исчезает из Вселенной; остается только исключительно сильно искривленная область пространства-времени.

Исследовать свойства черных дыр лучше всего, изучая, как движутся в этих сильно искривленных областях пространства-времени объекты – малые тела (материальные точки) и лучи света. Рассмотрим, например, черную дыру, изображенную на рис. 8.1. Представим себе, что на нее падают лучи света. Тот луч, который проходит очень далеко от черной дыры, отклоняется от своего обычного прямолинейного пути лишь совсем немного.

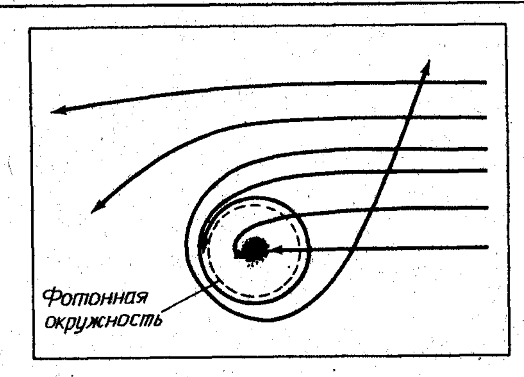


РИС. 8.1.

Как идут световые лучи вблизи черной дыры? Лучи света отклоняются мощным гравитационным полем, окружающим черную дыру. Вдали от дыры лучи искривляются слабо. Если же луч проходит совсем рядом с дырой, она может захватить его на круговую орбиту или засосать в себя совсем.

Вдалеке от черной дыры пространство-время почти плоское, и там световые лучи распространяются прямолинейно. Это – важный факт. Утверждения в некоторых недавно опубликованных книжках, что черные дыры представляют угрозу для нас, совершенно неверны. Черные дыры не могут странствовать по Вселенной, «заглатывая» там и сям планеты, звезды и галактики. Всего в нескольких тысячах километров от черных дыр с массой в 10 – 20 солнечных масс пространство-время практически плоское и релятивистские эффекты несущественны. Если однажды ночью Солнце с помощью какого-либо волшебства превратится в черную дыру, вы будуте спокойно спать в своей постели, не замечая ничего необычного, по крайней мере пока не наступит утро. Рассвет не наступит, но Земля будет продолжать двигаться по своей орбите с радиусом 150 миллионов километров, как она это делала все предыдущие пять миллиардов лет.

Возвращаясь к рис. 8.1, отметим, что лучи света, проходящие ближе к черной дыре, отклоняются на более значительные углы. Когда свет распространяется через область пространства-времени с большей кривизной, его мировая линия становится все более искривленной. Можно даже направить луч света точно в таком направлении относительно черной дыры, чтобы этот свет оказался пойман на *круговую орбиту* вокруг дыры. Эта сфера вокруг черной дыры иногда называется «фотонной сферой» или «фотонной окружностью»; она образована светом, обегающим вокруг черной дыры по всевозможным круговым орбитам. Каждая звезда во Вселенной посылает хоть немного света именно на такое расстояние от черной дыры, что этот свет захватывается на фотонную сферу.

Следует помнить, что эти круговые орбиты на фотонной сфере чрезвычайно *неустойчивы*. Чтобы понять смысл этого утверждения, представим себе почти круговую орбиту Земли вокруг Солнца. Орбита Земли устойчива. Если Землю слегка толкнуть, то не случится ничего особенного. Однако если луч света хоть немного отклонится от своего идеального кругового пути на фотонной сфере, то он очень быстро уйдет по спирали либо внутрь черной дыры, либо обратно в космическое пространство. Самое ничтожное возмущение, куда бы оно ни было направлено – внутрь или наружу, уводит свет с фотонной сферы. Именно в этом смысле говорят о неустойчивости всех круговых орбит на фотонной сфере.

Наконец, те лучи света, которые нацелены почти прямо на черную дыру, «всасываются» в нее. Такие лучи навсегда уходят из внешнего мира – черная дыра их буквально поглощает.

Представленный здесь сценарий описывает поведение самого простого из возможных типов черных дыр. В 1916 г., всего через несколько месяцев после того как Эйнштейн опубликовал свои уравнения гравитационного поля, немецкий астроном Карл Шварцшильд нашел их точное решение, которое, как оказалось впоследствии, описывает геометрию пространства-времени вблизи идеальной черной дыры. Это *решение Шварцшильда* описывает сферически симметричную черную дыру, характеризующуюся *только массой*. Породившая эту черную дыру гипотетическая умирающая звезда должна не вращаться и быть лишенной как электрического заряда, так и магнитного поля. Вещество такой умирающей звезды падает по радиусу «вниз» к центру звезды, и говорят, что получившаяся черная дыра обладает сферической симметрией. Если бы черная дыра возникала при коллапсе вращающейся звезды, то у нее было бы некое «привилегированное» направление, а именно дыра обладала бы осью вращения. Решение Шварцшильда свободно от подобных усложнений. Такая *шварцшильдовская черная дыра* представляет собою самый простой из всех возможных тип черной дыры. В этой и в следующей главе мы ограничимся рассмотрением лишь этого простого случая. Последующие главы будут посвящены электрически заряженным и вращающимся черным дырам.

Понять природу шварцшильдовской черной дыры можно, рассматривая массивную (но не вращающуюся и не имеющую заряда) умирающую звезду в процессе гравитационного коллапса. Пусть некто стоит на поверхности такой умирающей звезды, у которой только что иссякло ядерное топливо (рис. 8.2). Непосредственно перед началом коллапса наш наблюдатель берет мощный прожектор и направляет его лучи в разные стороны. Так как вещество звезды пока распределено в достаточно большом объеме пространства, гравитационное поле у поверхности

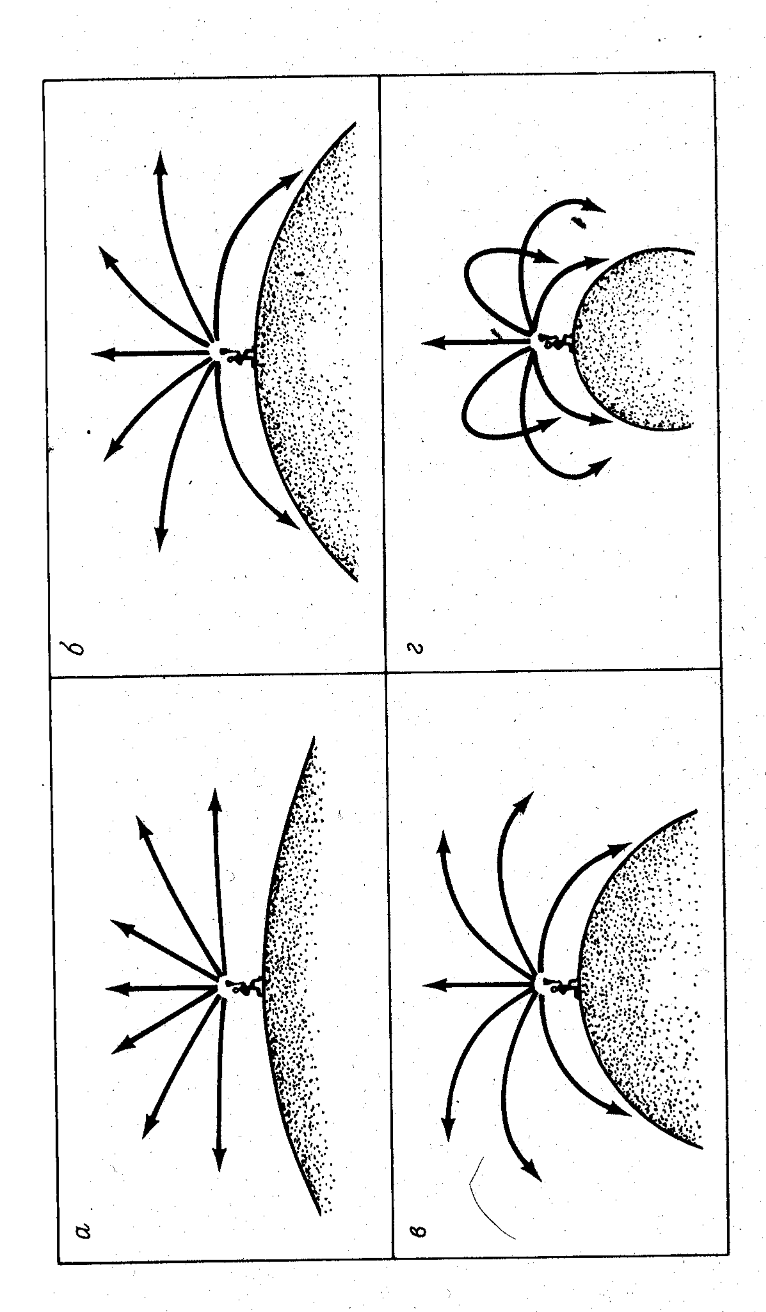


РИС. 8.2.
Как идут световые лучи от коллапсирующей звезды? Обреченный на гибель космонавт посылает лучи света с поверхности умирающей звезды. До начала коллапса (*а*) гравитационное поле было сравнительно слабым, и траектории световых лучей оказывались почти прямыми. На поздней стадии коллапса (*г*) пространство-время около звезды сильнейшим образом искривлено, и световые лучи отклоняются очень заметно.

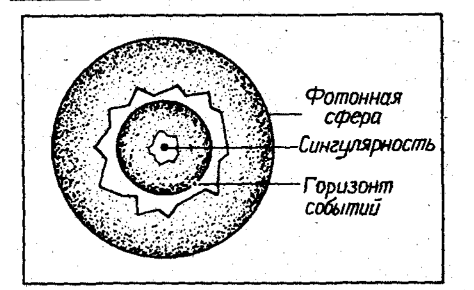


РИС. 8.3.
Шварцшильдовская черная дыра. Простейшая идеальная черная дыра (незаряженная и невращающаяся) окружена фотонной сферой. Сферический горизонт событий представляет собою «поверхность» черной дыры. В центре дыры находится сингулярность.

звезды остается довольно слабым. Поэтому луч прожектора распространяется прямолинейно или почти прямолинейно. Однако после начала коллапса вещество звезды сжимается во все меньшем и меньшем объеме. По мере уменьшения размеров звезды тяготение у ее поверхности возрастает все больше и больше. Увеличение кривизны пространства-времени приводит к отклонению светового луча от прежнего прямолинейного распространения. Сначала лучи, исходящие из прожектора под малым углом к горизонту, отклоняются вниз к поверхности звезды (см. рис. 8.2,*б*). Но в дальнейшем, по мере развития коллапса, нашему исследователю приходится направлять лучи вверх все ближе к вертикали, чтобы они могли навсегда уйти от звезды. В конце концов на некоторой критической стадии коллапса исследователь обнаружит, что уже никакой луч *не в состоянии уйти от звезды.* Как бы наш исследователь ни направлял свой прожектор, его луч все равно изменяет свое направление так, что снова падает вниз, на звезду. Тогда говорят, что звезда прошла свой *горизонт событий.* Ничто, очутившееся за горизонтом событий, не может выйти наружу, даже свет. Исследователь включает свой радиопередатчик и обнаруживает, что он ничего не может передать оставшимся снаружи, поскольку радиоволны не способны вырваться за горизонт событий. Наш исследователь буквально исчезает из внешней Вселенной.

Термин «горизонт событий» – очень удачное название для той поверхности в пространстве-времени, из которой ничто не может выбраться. Это действительно «горизонт», за которым все «события» пропадают из виду. Иногда горизонт событий, окружающий черную дыру, называют ее *поверхностью.*

Зная решение Шварцшильда, можно рассчитать положение горизонта событий, окружающего черную дыру. Например, поперечник сферы горизонта событий черной дыры с массой, равной 10 солнечным массам, составляет около 60 км. Как только умирающая звезда с массой в 10 солнечных масс сожмется до поперечника в 60 км, пространство-время столь сильно искривится, что вокруг звезды возникнет горизонт событий. В результате звезда исчезнет.

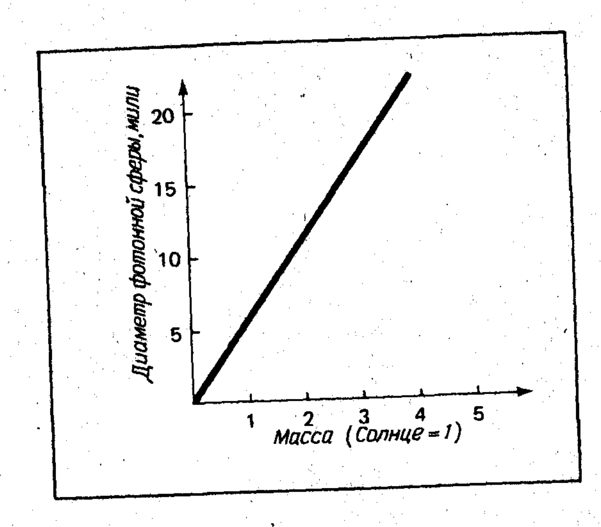


РИС. 8.4.
Размеры фотонной сферы. График показывает, как зависит диаметр фотонной сферы, окружающей шварцшильдовскую черную дыру, от ее массы. Так, например, дыра с массой в 3 солнечные массы окружена фотонной сферой с поперечником около 26 км.

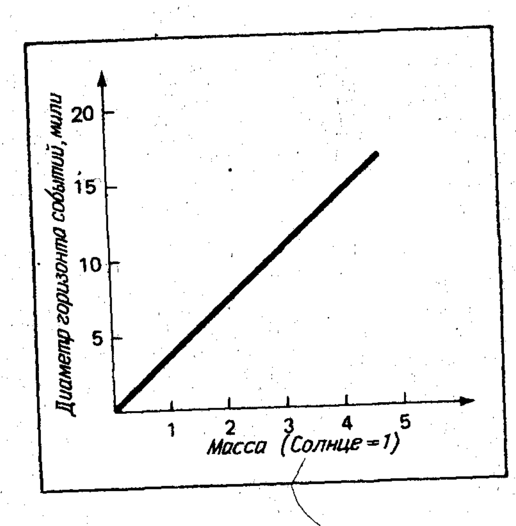


РИС. 8.5.
Размеры горизонта событий. Поперечник горизонта событий, окружающего шварцшильдовскую черную дыру, зависит от ее массы. Например, дыра с массой в 3 массы Солнца окружена горизонтом событий с поперечником около 18 км.

В момент, когда умирающая звезда уйдет за свой горизонт событий, ее размеры еще довольно велики, но никакие физические силы уже не смогут остановить ее дальнейшее сжатие. И звезда в целом продолжает сжиматься, пока, наконец, не прекратит свое существование в точке в центре черной дыры. В этой точке бесконечно давление, бесконечна плотность и бесконечна кривизна пространства-времени. Это «место» в пространстве-времени именуется *сингулярностью.*

Данные о структуре шварцшильдовской черной дыры подытожены на рис. 8.3. Прежде всего черную дыру окружает фотонная сфера, состоящая из лучей света, движущихся по неустойчивым круговым орбитам. Внутри фотонной сферы находится горизонт событий – односторонне пропускающая поверхность в пространстве-времени, из которой ничто не может вырваться. Наконец, в центре черной дыры находится сингулярность. Все то, что проваливается сквозь горизонт событий, засасывается в сингулярность, где оно под действием бесконечно сильно искривленного пространства-времени прекращает свое существование. На рис. 8.4 и 8.5 показаны соответственно зависимости между массой черной дыры и поперечниками ее фотонной сферы и горизонта событий.

После того как умирающая звезда заходит за свою фотонную сферу и приближается к горизонту событий, от нее в окружающую Вселенную может вырваться все меньше и меньше световых лучей. Иллюстрированные на рис. 8.2 эффекты становятся все более заметными. Подобный захват лучей света коллапсирующей звездой можно описать с помощью воображаемого конуса, показанного на рис. 8.6 и называемого *конусом выхода.* Навсегда уйти от звезды могут только те лучи, которые покидают ее в пределах конуса выхода. Лучи же, идущие от поверхности звезды вне конуса выхода, отклоняются назад, к ее поверхности.

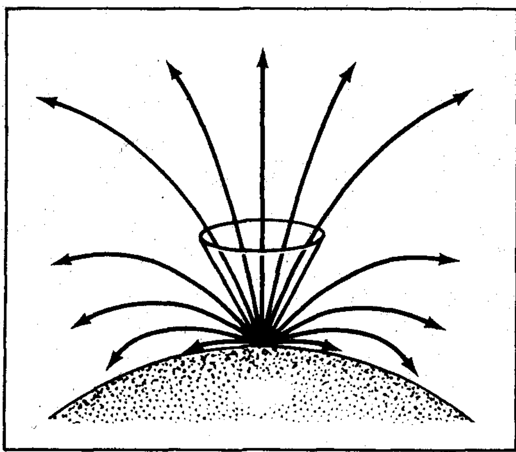


РИС. 8.6.
Конус выхода. С помощью этого воображаемого конуса удобно разделять световые лучи на способные покинуть звезду и на те лучи, которые она от себя не отпускает. Уйти в окружающую Вселенную удается только тем лучам, которые испущены с поверхности звезды под углами, заключенными во внутренней части конуса выхода.

По мере приближения катастрофического коллапса массивной звезды к его неизбежному концу, лучам света с поверхности звезды становится все труднее и труднее уйти навсегда от звезды. Эти уходящие вовне лучи должны быть испущены внутри все более сужающегося конуса с осью, направленной вдоль вертикали. Иными словами, по мере того как звезда подходит к своему горизонту событий, конус выхода схлопывается. Непосредственно над границей фотонной сферы конус выхода широко раскрыт. От звезды могут уйти лучи света, испущенные под любыми углами. Но когда звезда подходит к своему горизонту событий, конус выхода становится настолько узким, что все лучи света в конце концов заворачиваются назад, к поверхности звезды.

Поведение конуса выхода дает первое важное указание на то, как должна выглядеть звезда, превращающаяся в черную дыру. По мере схлопывания конуса выхода от звезды уходит все меньше и меньше света. Поэтому астроном, наблюдающий подобную звезду издалека, видит ее все более и более слабой. Фактически такое убывание яркости умирающей звезды происходит *очень быстро.* Рассмотрим, например, образование черной дыры из звезды с массой в 10 солнечных масс. Как показано на рис. 8.7,

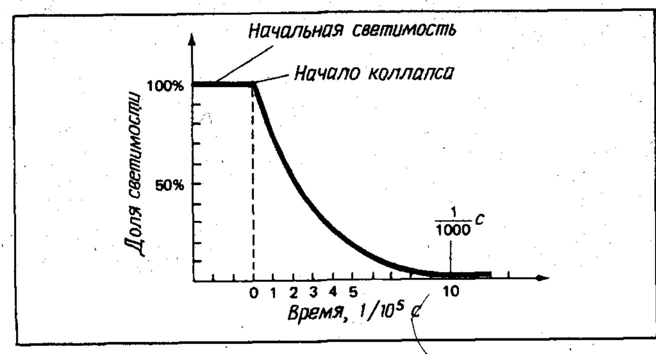


РИС. 8.7.
Светимость коллапсирующей звезды. Сразу после начала конечного этапа коллапса звезда становится чрезвычайно слабой за очень короткий промежуток времени. График построен для звезды с массой 10 солнечных. Всего через 1/1000 с светимость звезды падает до 2% первоначальной, а спустя 1/100 с она составляет менее одной квадрильонной (10^{-15}) первоначальной.

с приближением поверхности звезды к горизонту событий ее яркость убывает с невероятной быстротой. Спустя всего 1/1000 с после начала гравитационного коллапса конус выхода становится настолько узким, что лишь одна квадрильонная (10^{-15}!) света звезды может ускользнуть во внешнюю Вселенную. Всего миг – и бывшая яркая звезда становится почти совершенно черной!

Одновременно с быстрым ослаблением яркости умирающей звезды вступает в игру и другой важный эффект. Вспомним, что в гл. 5 упоминалось о том, что тяготение вызывает замедление течения времени. Этот эффект именуется *гравитационным красным смещением*, ибо свет, испускаемый атомами, погруженными в гравитационное поле, «смещается» в сторону более длинных волн. Поэтому в ходе усиления гравитационного поля вблизи звезды в процессе ее коллапса свет, испускаемый атомами на поверхности этой звезды, испытывает все большее и большее красное смещение. Поэтому для наблюдающего ее со стороны астронома коллапсирующая звезда становится одновременно и слабой, и излучающей свет все более длинных (более «красных») волн.

Замедление хода времени, которое почти невозможно заметить в слабом гравитационном поле Земли, становится в процессе образования черной дыры фактором фундаментальной важности. Ведь на самом горизонте событий течение времени *полностью останавливается* (рис. 8.8). При объяснении этого утверждения нужно быть очень осторожным. Проиллюстрируем ситуацию, вообразив, что мы бросили в черную дыру камень. Допустим, вы выпустили этот камень из рук, находясь очень далеко от черной дыры, где пространство-время почти плоское. Наблюдая движение камня, мы увидим, что по мере приближения к черной дыре он падает все быстрее и быстрее. Если бы была верна ньютоновская теория, то наш камень продолжал бы увеличивать скорость, и в тот момент, когда он врезался бы в сингулярность, он двигался бы практически с бесконечной скоростью. Но в столь сильных гравитационных полях ньютоновская теория не может давать правильных ответов. Оказывается, когда камень подлетает к горизонту событий, начинает преобладать действие замедления времени. Вы обнаружите, к своему удивлению, что камень начинает падать все медленнее и совсем останавливается на горизонте событий, потому что на этом горизонте для внешнего наблюдателя перестает течь время. Оставаясь вдалеке от черной дыры, мы должны прождать бесконечно долгий промежуток времени, чтобы увидеть, как камень пересечет горизонт событий.

Итак, мы никогда не увидим такого события, как пересечение камнем горизонта событий. Тот, кто падает вместе с камнем, будет наблюдать *совершенно иную* картину. Свободно падающий

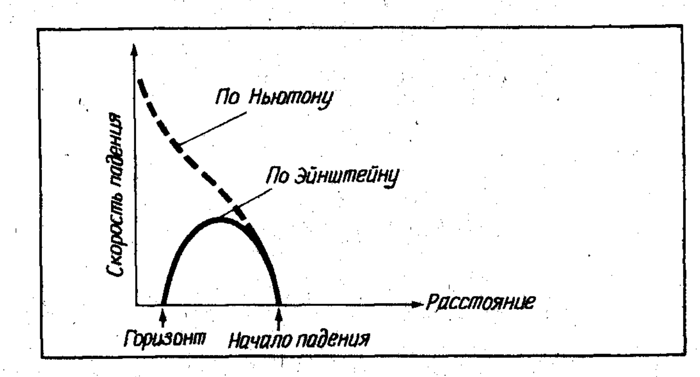


РИС. 8.8.
Скорость тела при свободном падении. Удаленный наблюдатель видит, что свободное падение тела на черную дыру замедляется по мере того, как оно приближается к горизонту событий. Кажется, что на горизонте событий тело «застывает», ибо там останавливается течение времени.

наблюдатель не сможет заметить замедления времени. Если вы попробуете сказать ему, что его часы идут замедленно, он решительно возразит. Он сравнит свои часы со всеми часами в своем космическом корабле, проверит их по скорости распада радиоактивных изотопов и даже сверит их со своим пульсом. С точки зрения падающего наблюдателя, время продолжает у него идти так, как и раньше. Удаленный наблюдатель, находящийся в плоском пространстве-времени, объяснит эту странную ситуацию тем, что все, наблюдаемое падающим наблюдателем, замедлилось в одной и той же пропорции, включая его пульс, его процессы мышления и темп, в котором он стареет. Согласно утверждению удаленного наблюдателя, космонавт, падающий на черную дыру, никогда не достигнет горизонта событий; он останется живым навсегда в преддверии вступления в черную дыру в состоянии замедленной жизнедеятельности, и ему потребуются многие миллиарды лет, чтобы преодолеть те несколько сантиметров, которые отделяют его от горизонта событий.

Однако, согласно данным падающего наблюдателя, его часы отсчитывают время в своем обычном темпе. Поэтому он проскакивает за горизонт событий спустя весьма краткий срок, если судить по его часам. Однако сразу после прохождения через горизонт событий он обнаруживает нечто неладное. Подобно тому как на горизонте событий остановилось время для внешнего наблюдателя, внутри горизонта оно меняется ролями с пространством. Вдали от черной дыры, скажем у нас на Земле, человек способен перемещаться в трех пространственных измерениях (вверх и вниз, налево и направо, вперед и назад). Однако во временном измерении мы бессильны «ходить» туда и обратно. Мы

безостановочно идем вперед во времени – от нашего рождения к старости и к смерти, хотим мы этого или нет. Внутри же горизонта событий роли пространства и времени меняются. Злочастный космонавт, попавший под горизонт событий, начинает безостановочно увлекаться вперед в *пространстве* навстречу сингулярности! Он бессилен избежать рокового столкновения с сингулярностью. На рис. 8.9 показано, сколько времени может, самое большее, пройти по часам космонавта между моментами пересечения горизонта и прихода в сингулярность. Что бы он ни предпринимал, даже имея в своем распоряжении наимощнейшие ракетные двигатели, он должен попасть в сингулярность спустя промежуток времени, *не меньший*, чем указано на этом графике. Например, пройдя под горизонт черной дыры с массой 6,5 солнечной массы, космонавт должен достигнуть сингулярности *менее* чем за 1/1000 с.

Чтобы избежать путаницы, связанной с измерением времени, физики вводят *два типа* времени. *Координатное время* – это время, которое измеряет наблюдатель, находящийся далеко от черной дыры (т. е. в плоском пространстве-времени). *Собственное время* – это то время, которое измеряет по своим часам свободно падающий наблюдатель. Времена эти *разные*. В координатном времени камню, брошенному в черную дыру, нужно лететь миллионы миллионов лет, чтобы приблизиться к горизонту событий. В собственном же времени, по часам, привязанным к падающему камню, последний уже через короткий промежуток времени пере-

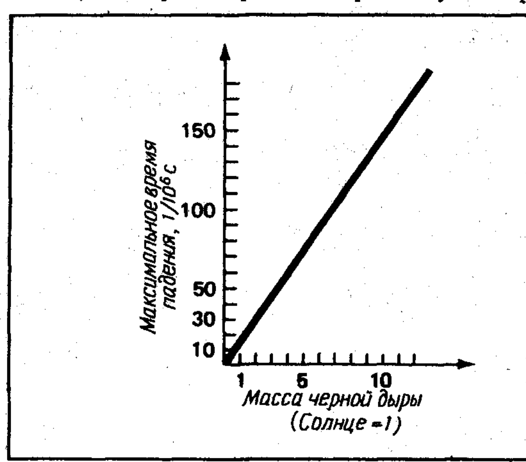


РИС. 8.9.
Максимальное время падения с горизонта событий до сингулярности. Падающий наблюдатель, прошедший под горизонт событий, *не может* не попасть в сингулярность спустя промежуток времени, не *меньший*, указанного на графике.

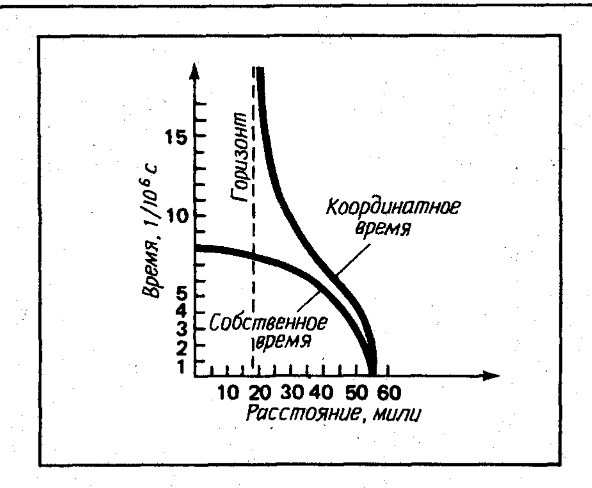


РИС. 8.10.
Сравнение собственного и координатного времен. На графике показана связь между собственным и координатным временем для тела, падающего в черную дыру с массой 10 солнечных с начального расстояния 90 км. По своему собственному времени падающее тело врезается в сингулярность через 8 миллионных долей секунды. В координатном же времени оно никогда не достигнет даже горизонта событий.

сечет этот горизонт. На рис. 8.10 сопоставлены промежутки координатного и собственного времен, в течение которых тело падает на черную дыру с массой 10 солнечных масс с начального расстояния 90 км.

Что касается человека, падающего на черную дыру, то следует уделить внимание и другим любопытным эффектам. Предположим, что вы падаете вниз ногами к черной дыре. Ваше падение все время свободное, так что вы находитесь в состоянии невесомости. Однако при сближении с черной дырой вы начнете ощущать нечто необычное, поскольку ваши ноги оказываются ближе к черной дыре, чем ваша голова. Дело в том, что ваши ноги будут падать быстрее, чем голова. В результате вас станет вытягивать в длинную тонкую нить. К моменту пересечения горизонта ваша длина может достичь сотни километров. Как видите, падение на черную дыру – занятие не из приятных. И в самом деле, еще задолго до того, как вы приблизитесь к фотонной сфере, ваше тело будет разорвано приливными силами невероятной мощи. Общая картина представлена на рис. 8.11.

Здесь внимательный читатель мог бы выразить недоумение. В конце концов, если наблюдатели в плоском пространстве-времени (например, астрономы на Земле) никогда не могут видеть, как что-нибудь опускается под горизонт событий, могут ли вообще возникать сами черные дыры? Не потребуется ли бесконечно длительный срок (с нашей точки зрения) для того, чтобы поверх-

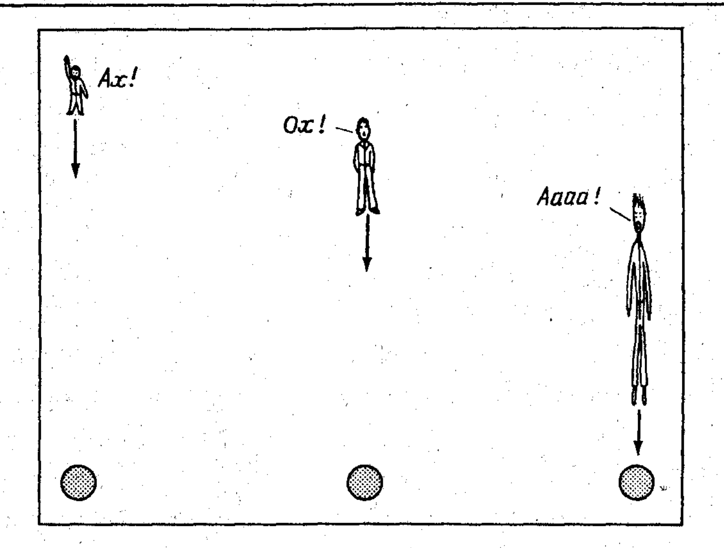


РИС. 8.11.
Приливные силы. При падении на черную дыру наблюдатель растягивается и разрывается на части огромными приливными силами.

ность умирающей звезды достигла горизонта событий? И да, и нет! Безусловно верно, что последние несколько атомов на поверхности коллапсирующей звезды никогда не уйдут за горизонт событий. Но дело не в этом. Как можно видеть из рис. 8.7, вся звезда становится практически черной уже спустя несколько тысячных секунды после начала коллапса. При формировании горизонта событий можно считать, что почти вся звезда уже очутилась за горизонтом. Вещество под горизонтом событий очень быстро падает на сингулярность. Эту картину можно изобразить на трехмерной диаграмме пространства-времени (рис. 8.12). Для случая решения Шварцшильда радиус горизонта событий часто называют *шварцшильдовским радиусом*. Как только необходимое количество вещества уйдет под шварцшильдовский радиус, образуется горизонт событий, и это вещество оказывается в ловушке, где оно коллапсирует до самой сингулярности. А несколько замешкавшихся атомов из внешних слоев умирающей звезды так и не смогут никогда перебраться под горизонт событий и обречены вечно парить над поверхностью со шварцшильдовским радиусом. Но участь этих нескольких отставших атомов не представляет интереса ни для каких практических целей.

Разобраться в структуре черных дыр удобнее всего, представив себе воображаемое путешествие на космическом корабле, оборудованном большими смотровыми иллюминаторами. В ряде следующих глав мы используем такую «технику» и сможем

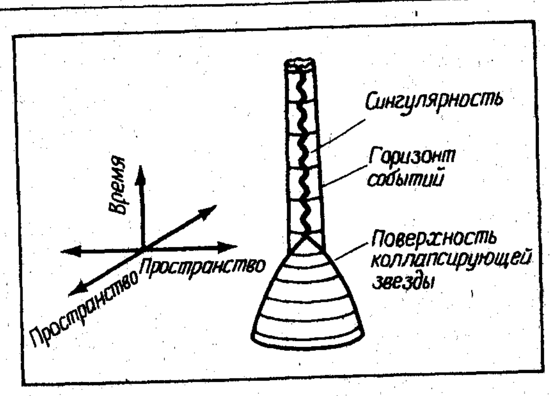


РИС. 8.12.
Образование черной дыры. После того как в области с поперечником меньше 2 шварцшильдовских радиусов соберется достаточное количество вещества, вокруг последнего возникает горизонт событий. Затем захваченное вещество быстро падает на сингулярность в центре черной дыры.

узнать, что увидели бы бесстрашные астрономы, если бы они действительно отправились в путешествие к различным типам черных дыр, в сами эти дыры и даже сквозь них.

Вообразим себе космический корабль, показанный на рис. 8.13. Он снабжен двумя большими иллюминаторами. Носо-

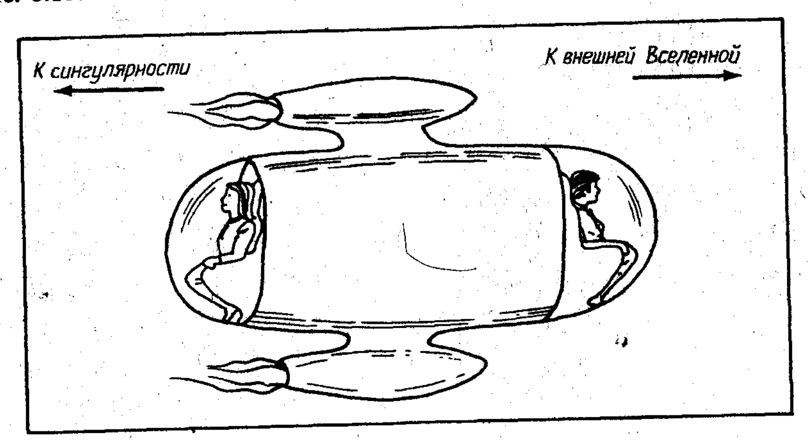


РИС. 8.13.
Космический корабль. Два любознательных астронома решили выяснить, как же в действительности выглядит черная дыра. Для этого они построили космический корабль, снабженный двумя иллюминаторами. Носовой иллюминатор обращен прямо на середину черной дыры, а кормовой направлен во внешнюю Вселенную. Из каждого иллюминатора видна в точности половина небесной сферы. Корабль оборудован также мощными реактивными двигателями, с помощью которых космонавты могут зависать над черной дырой на разных высотах.

вой иллюминатор смотрит прямо в центр черной дыры, а кормовой – в противоположном направлении, позволяя обозревать окружающую Вселенную. Из каждого иллюминатора видна в точности половина всего неба. Кроме того, наш космический корабль обладает очень мощными ракетными двигателями, позволяющими ему удерживаться на разных высотах над горизонтом событий. На борту корабля находятся два астронома, которые фотографируют с различных расстояний от черной дыры все, что им видно из иллюминаторов.

Для удобства наши космические астрономы выражают свое расстояние от черной дыры в шварцшильдовских радиусах, а не милях или километрах. Вспомним, что шварцшильдовский радиус – это радиус горизонта событий. Чем массивнее черная дыра, тем больше ее шварцшильдовский радиус. В табл. 8.1 приведены значения шварцшильдовского радиуса черных дыр, обладающих разными массами.

Эта таблица тесно связана с рис. 8.5. Поперечник горизонта событий черной дыры – это в точности удвоенная величина ее шварцшильдовского радиуса. Далее, раз поперечник горизонта

Таблица 8.1

ШВАРЦШИЛЬДОВСКИЕ РАДИУСЫ ЧЕРНЫХ ДЫР, ОБЛАДАЮЩИХ РАЗНЫМИ МАССАМИ

Масса черной дыры	Шварцшильдовский радиус (радиус горизонта событий)
1 т	$13 \cdot 10^{-15}$ Å
10^{6} т	$13 \cdot 10^{-9}$ Å
10^{12} т	$13 \cdot 10^{-3}$ Å
10^{15} т	13 Å
1 масса Земли	0,8 см
1 масса Юпитера	2,8 м
1 масса Солнца	3 км
2 массы Солнца	6 км
3 массы Солнца	9 км
5 масс Солнца	15 км
10 масс Солнца	30 км
50 масс Солнца	150 км
100 масс Солнца	300 км
10^{3} масс Солнца	$3 \cdot 10^{3}$ км
10^{6} масс Солнца	10 световых секунд
10^{9} масс Солнца	2,8 свет. часов
10^{12} масс Солнца	117 свет. дней
10^{15} масс Солнца	320 свет. лет

событий равен удвоенному шварцшильдовскому радиусу, то поперечник фотонной сферы – это утроенный шварцшильдовский радиус.

Путешествие двух астрономов на нашем воображаемом космическом корабле начинается с того, что этому уникальному кораблю предоставляется возможность просто падать на черную дыру вдоль ее радиуса. На разных этапах сближения с дырой космонавты включают мощные ракетные двигатели, которые мгновенно останавливают падение корабля. В эти моменты покоя астрономы делают два снимка – один из носового иллюминатора (вид в сторону черной дыры), а другой – из кормового (вид назад на Вселенную). Корабль останавливался пять раз, и всякий раз делалась пара фотографий:

Снимок	*Расстояние от черной дыры*
Фото А	Расстояние велико (много шварцшильдовских радиусов)
Фото Б	5 шварцшильдовских радиусов
Фото В	2 шварцшильдовских радиуса
Фото Г	На фотонной сфере (1,5 шварцшильдовского радиуса)
Фото Д	Прямо над горизонтом событий (чуть больше 1 шварцшильдовского радиуса)

На рис. 8.14 показано, где был космический корабль относительно черной дыры в моменты получения снимков.

На очень больших расстояниях от черной дыры сама дыра выглядела как маленькое пятно света в середине носового иллюминатора (рис. 8.15,*А*). Окружающее небо оставалось практически неискаженным, за одним важным исключением. Все звезды

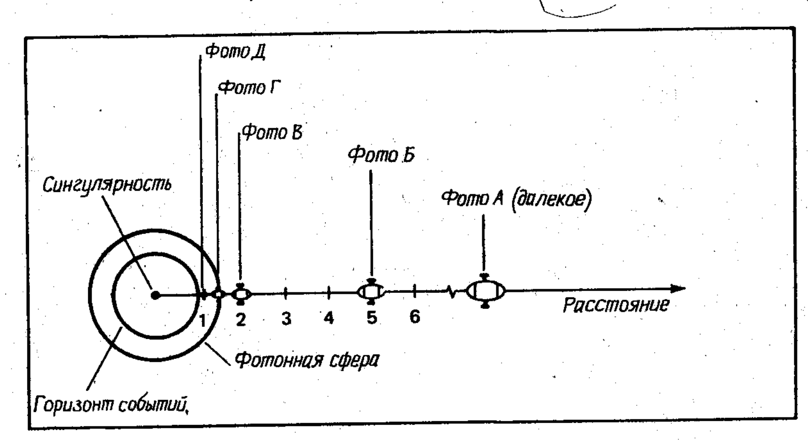


РИС. 8.14.
Приближение космического корабля к черной дыре. Пять пар фотографий шварцшильдовской черной дыры сняты из указанных на рисунке точек.

РИС. 8.15.

Фото А (вид издалека от черной дыры). Расстояние от черной дыры равно многим шварцшильдовским радиусам. Черная дыра выглядит отсюда как маленькое черное пятнышко в центре поля зрения носового иллюминатора.

Фото Б (вид с расстояния 5 шварцшильдовских радиусов). При взгляде с 5 шварцшильдовских радиусов угловой поперечник черной дыры составляет около 46°; она занимает центральную часть поля зрения носового иллюминатора. Дали Вселенной все еще видны в кормовой иллюминатор, хотя там уже заметны некоторые искажения.

во Вселенной посылают хоть немного света в окрестности фотонной сферы. Этот свет кружит вокруг черной дыры раз-другой или больше, а затем его траектория раскручивается спиралью навстречу космическому кораблю. Поэтому астроном, проводящий наблюдения через носовой иллюминатор, видит многократные изображения всех звезд Вселенной, обрамляющие видимый «край» черной дыры. (Чтобы рис. 8.15,*А*–*Д* не получились перегруженными, все эти многократные изображения опущены.) Таким образом, вид неба около черной дыры будет весьма сложным и искаженным.

В 1975 г. Кэннингэм из Калифорнийского технологического института (США) провел ряд расчетов, которые помогли выяснить, как выглядит черная дыра, если глядеть на нее с разных расстояний. Рис. 8.15,*Б* показывает (на основании этих вычислений), что будет видно с расстояния в 5 шварцшильдовских радиусов. Так как космический корабль в этом случае находится вблизи черной дыры, она представляется большей, чем на рис. 8.15,*А*. На расстоянии в 5 шварцшильдовских радиусов (что соответствует расстоянию 150 км, если черная дыра имеет массу в 10 солнечных масс) угловой поперечник дыры равен примерно 56°. Вид же из кормового иллюминатора остается практически неискаженным.

С расстояния в 2 шварцшильдовских радиуса (60 км от черной дыры в 10 раз более массивной, чем Солнце) черная дыра – основной объект в небе перед космическим кораблем. Ее угловой поперечник вырос уже до 136° (рис. 8.15,*В*). Все видимое вокруг нее из носового иллюминатора небо чрезвычайно сильно искажено и заполнено многократными изображениями огромного количества звезд и галактик. Даже из кормового иллюминатора небо наблюдается уже сильно искаженным.

С «высоты» фотонной сферы (45 км от черной дыры в 10 раз массивней Солнца) изображение черной дыры занимает все поле зрения носового иллюминатора космического корабля, как видно

Фото В (вид с расстояния 2 шварцшильдовских радиуса). При взгляде с 2 шварцшильдовских радиусов угловой поперечник черной дыры достигает 136°, и она закрывает бóльшую часть поля зрения носового иллюминатора. Вид в кормовом иллюминаторе еще более искажен, чем на фото Б.

Фото Г (вид с поверхности фотонной сферы). При взгляде с фотонной сферы (1,5 шварцшильдовского радиуса) черная дыра заполняет все поле зрения носового иллюминатора, так что ее угловой поперечник равен 180°. Вид назад также чрезвычайно искажен, особенно по краям поля зрения.

Фото Д (вид с высоты в несколько метров над горизонтом событий). Прямо над горизонтом событий носовой иллюминатор сплошь черный. Кажущиеся «края» черной дыры теперь заполняют со всех сторон кормовой иллюминатор. Видимая через него внешняя Вселенная сжалась теперь в небольшой кружок с центром в направлении от черной дыры.

на рис. 8.15,*Г*. По краям поля зрения кормового иллюминатора теперь видны бесчисленные многократные изображения.

По мере дальнейшего приближения космического корабля к горизонту событий черная дыра начинает просматриваться по краям поля зрения кормового иллюминатора. Вся внешняя Вселенная видна теперь как маленький кружок в центре кормового иллюминатора (рис. 8.15,*Д*). Размеры этого кружка определяются углом раствора конуса выхода, о котором мы упоминали выше. На самом горизонте событий (это примерно в 30 км от центра черной дыры в 10 раз более массивной, чем Солнце), где конус схлопывается, все звезды неба собираются в одной точке в центре поля зрения кормового иллюминатора.

Вспомним, что наш космический корабль снабжен мощными ракетными двигателями, способными остановить его падение на разных расстояниях от черной дыры, так что астрономы могут не спеша вести свои наблюдения. Однако гравитационное поле черной дыры настолько мощное, что уже на расстоянии нескольких шварцшильдовских радиусов двигатели ракеты должны работать на полную мощность. Еще задолго до того, как астрономы доберутся до точки, из которой они смогли бы сделать снимок *Б*, им придется испытать действие ускорения, составляющего тысячи g, которое буквально расплющит их о переборки корабля.

Чтобы избежать подобной участи, другие два астронома принимают решение совершить *свободное падение* на черную дыру до конца. Их космический корабль новейшей конструкции вообще лишен ракетных двигателей, которые замедляли бы его падение. Более того, чтобы избежать разрывающего действия приливных сил, произведена микроминиатюризация как космического корабля, так и самих космонавтов. Тем не менее они понимают, что и такая экспедиция равносильна самоубийству, ибо, попав под горизонт событий, они будут обречены упасть на сингулярность. Эти новые два астронома видят из иллюминаторов своего обреченного на гибель космического корабля совершенно иную картину. Однако, чтобы понять смысл этой картины, нам придется сначала рассмотреть вопрос о природе шварцшильдовской геометрии.

9

ГЕОМЕТРИЯ РЕШЕНИЯ ШВАРЦШИЛЬДА

В 1916 г., всего лишь через несколько месяцев после того, как Эйнштейн опубликовал свои уравнения гравитационного поля в общей теории относительности, немецкий астроном Карл Шварцшильд нашел решение этих уравнений, описывающее простейшую черную дыру. Шварцшильдовская черная дыра «простая» в том смысле, что она сферически симметрична (т. е. у нее нет «предпочтительного» направления, скажем оси вращения) и характеризуется лишь массой. Поэтому здесь не учитываются те усложнения, которые вносят вращение, электрический заряд и магнитное поле.

Начиная с 1924 г. физики и математики начали осознавать, что в шварцшильдовском решении уравнений гравитационного поля есть что-то необычное. В частности, у этого решения имеется математическая особенность на горизонте событий. Сэр Артур Эддингтон был первым, кто подобрал новую систему координат, в которой этот эффект отсутствует. В 1933 г. Жорж Лемэтр продвинул эти исследования дальше. Однако лишь Джон Лайтон Синг раскрыл (в 1950 г.) истинную сущность геометрии шварцшильдовской черной дыры, открыв тем самым пути для последующих важных работ М. Д. Крускала и Г. Секереша в 1960 г.

Чтобы разобраться в деталях, выберем прежде всего трех ребят – Борю, Васю и Машу – и представим себе, что они парят в космосе (рис. 9.1). Всегда можно взять в космосе произвольную точку и определить положения всех троих, измеряя расстояния от них до этой точки. Например, Боря находится на расстоянии 1 км от этой произвольной начальной точки отсчета, Вася – в 2 км, а Маша – в 4 км. Характеристику положения в таком случае обычно обозначают буквой r и называют радиальным расстоянием. Таким путем можно выразить расстояние до любого объекта во Вселенной.

Заметим теперь, что наши три приятеля неподвижны в пространстве, но «перемещаются» во времени, ибо становятся все старше и старше. Эту особенность можно изобразить на пространственно-временной диаграмме (рис. 9.2). Расстояние от произвольной начальной точки отсчета («начала») до другой точки

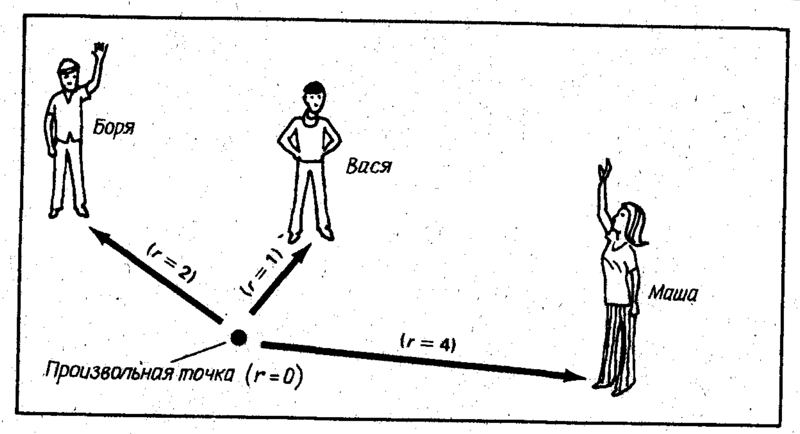


РИС. 9.1.

Расположение в пространстве. Расположение каких-либо объектов в пространстве может быть охарактеризовано расстоянием по радиусу от произвольной начальной точки отсчета до каждого из объектов.

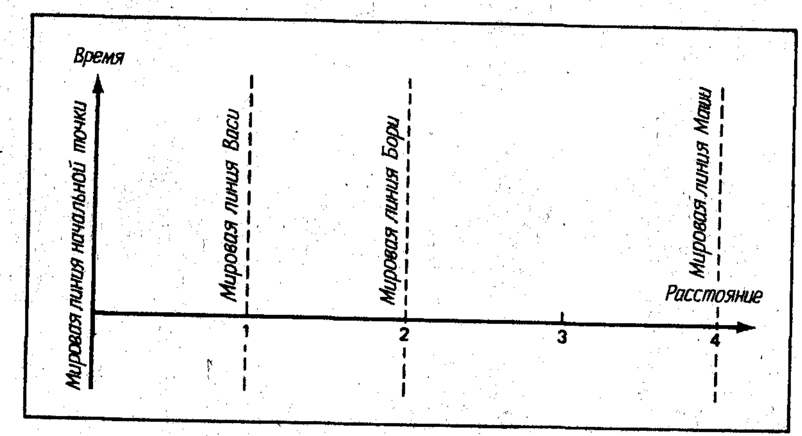


РИС. 9.2.

Диаграмма пространства-времени. Можно построить такую диаграмму пространства-времени, на которой по пространственной оси откладывается радиальное расстояние от произвольной точки начала отсчета. Масштабы, отложенные по осям, таковы, что световые лучи распространяются по прямым с наклоном 45°.

в пространстве откладывается здесь вдоль горизонтальной оси, а время – вдоль вертикали. Кроме того, как и в частной теории относительности, удобно взять на координатных осях этого графика такие масштабы, чтобы лучи света описывались прямой с наклоном 45°. На такой диаграмме пространства-времени ми-

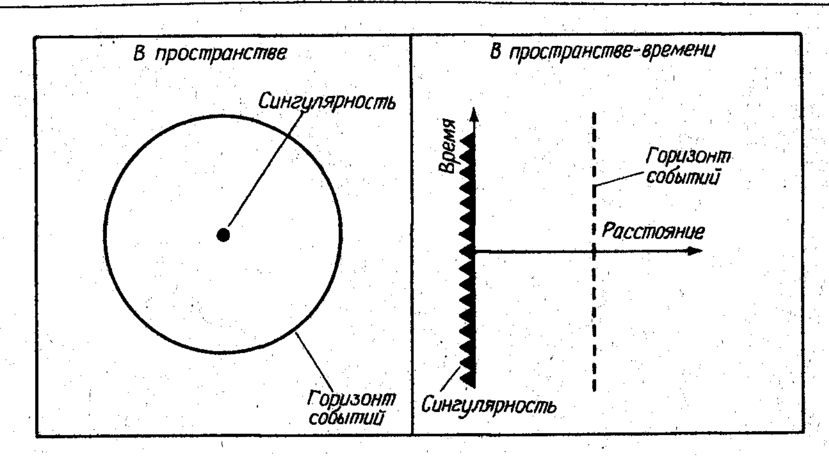


РИС. 9.3.

Черная дыра в пространстве и в пространстве-времени. Шварцшильдовская черная дыра изображена слева в пространстве. Она состоит из сингулярности, окруженной горизонтом событий. Справа дана диаграмма пространства-времени для той же дыры. Расстояние измеряется радиально от сингулярности.

ровые линии всех троих ребят идут вертикально вверх. Они все время остаются на одних и тех же расстояниях от точки начала ($r = 0$), но постепенно становятся все старше и старше.

Важно осознать, что левее точки $r = 0$ на рис. 9.2 вообще ничего нет. Эта область соответствует чему-то, что можно назвать «отрицательным пространством». Так как невозможно находиться «на расстоянии минус 3 м» от какой-либо точки (начала отсчета), то расстояния от начала всегда выражаются положительными числами.

Перейдем теперь к шварцшильдовской черной дыре. Как уже говорилось в предыдущей главе, такая дыра состоит из сингулярности, окруженной горизонтом событий на расстоянии 1 шварцшильдовского радиуса. Изображение такой черной дыры в пространстве дано на рис. 9.3 слева. При изображении черной дыры на пространственно-временной диаграмме произвольную точку начала отсчета координат для удобства совместим с сингулярностью. Тогда расстояния измеряются непосредственно от сингулярности по радиусу. Получившаяся диаграмма пространства-времени изображена на рис. 9.3 справа. Подобно тому как наши приятели Боря, Вася и Маша изображаются на рис. 9.2 вертикальными мировыми линиями, мировая линия горизонта событий идет вертикально вверх в точности на 1 шварцшильдовский радиус правее мировой линии сингулярности, которая на рис. 9.3 изображена пилообразной линией.

Хотя в рис. 9.3, изображающем шварцшильдовскую черную

дыру в пространстве-времени, как будто нет ничего загадочного, к началу 1950-х годов физики начали понимать, что этой диаграммой суть дела не исчерпывается. У черной дыры имеются разные области пространства-времени: первая между сингулярностью и горизонтом событий и вторая за пределами горизонта событий. Мы *не смогли* полностью выразить в правой части рис. 9.3, как именно связаны между собой эти области.

Чтобы разобраться во взаимосвязи между областями пространства-времени внутри и вне горизонта событий, представим себе черную дыру с массой в 10 солнечных масс. Пусть из сингулярности вылетает астроном, пролетает через горизонт событий наружу, поднимается на максимальную высоту в 1 миллион километров над черной дырой, а затем падает обратно, сквозь горизонт событий, и снова падает в сингулярность. Полет астронома изображен на рис. 9.4.

Внимательному читателю это может показаться невозможным – ведь из сингулярности выскочить вообще нельзя! Ограни-

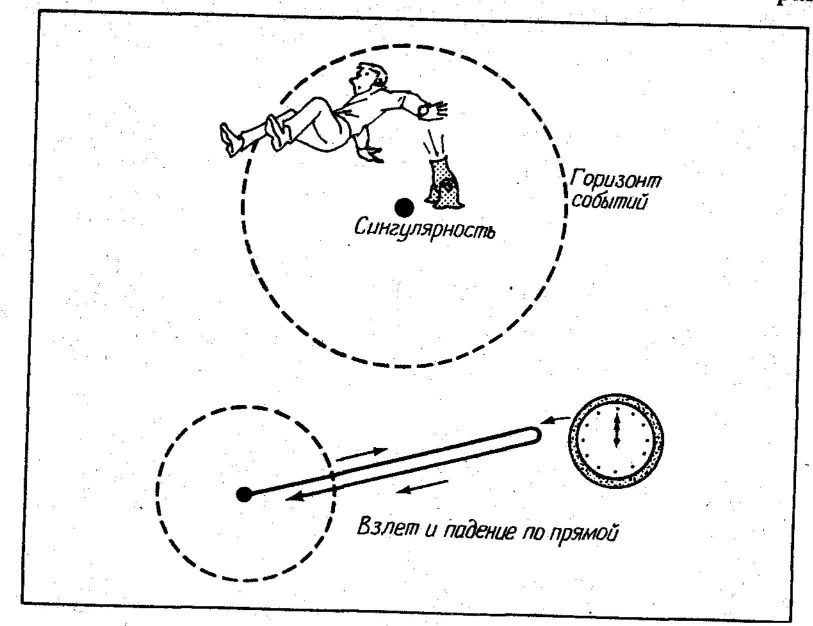


РИС. 9.4.
Увлекательное путешествие. Астроном вылетает из сингулярности черной дыры с массой 10 солнечных масс, поднимается над горизонтом событий и достигает максимальной высоты 1 млн. км. На верхней точке траектории его часы (измеряющие собственное время) синхронизуются с часами удаленных ученых (измеряющих координатное время). Затем астроном снова радиально падает на черную дыру, опускается под горизонт событий и попадает в сингулярность.

чимся тем, что сошлемся на чисто *математическую* возможность такого путешествия. Как станет видно из дальнейшего, полное решение Шварцшильда содержит *как* черную, *так* и белую дыру. Поэтому на протяжении нескольких следующих разделов от читателя потребуется терпение и внимание. Здесь и в последующих главах мы будем иллюстрировать изложение с помощью путешествий астрономов или космонавтов к черным дырам. Для удобства будем говорить о космонавте просто «он».

Астроном-путешественник имеет с собой часы, чтобы измерять свое собственное время. У домоседов-ученых, следящих за его полетом с расстояния в 1 миллион километров от черной дыры, тоже имеются часы. Пространство там плоское, и часы измеряют координатное время. При достижении высшей точки траектории (на расстоянии миллиона километров от черной дыры) *все* часы ставятся на один и тот же момент (синхронизуются) и теперь показывают 12 ч дня. Тогда можно вычислить, в какой момент (как по собственному времени путешественника, так и по координатному времени) астроном попадет в каждый интересующий нас пункт своей траектории.

Напомним, что часы астронома измеряют его собственное время. Поэтому по ним нельзя заметить «замедления хода времени», обусловленного эффектом гравитационного красного смещения. При заданных значениях массы черной дыры и высоты над ней высшей точки пути расчеты приводят к следующему результату:

В СОБСТВЕННОМ ВРЕМЕНИ АСТРОНОМА

1. Астроном вылетает из сингулярности в 11 ч 40 мин утра (по своим часам).
2. Через 1/10 000 с после 11 ч 40 мин он перелетает через горизонт событий во внешний мир.
3. В 12 ч дня он достигает максимальной высоты в 1 миллион километров над черной дырой.
4. За одну 1/10 000 с до 12 ч 20 мин дня он пересекает горизонт событий, двигаясь внутрь.
5. Астроном возвращается в сингулярность в 12 ч 20 мин дня.

Иными словами, на движение от сингулярности до горизонта событий и обратно ему нужно одно и то же время – 1/10 000 с, тогда как на перемещение от горизонта событий до высшей точки своей траектории и наоборот он затрачивает всякий раз 20 мин (за 20 мин он проходит 1 миллион километров). Следует иметь в виду, что собственное время при полете течет стандартным образом.

Проводящие издалека наблюдения ученые измеряют по

своим часам координатное время; их вычисления дают следующие результаты:

В КООРДИНАТНОМ ВРЕМЕНИ

1. Астроном вылетает из сингулярности в 11 ч 40 мин утра.
2. Он выходит через горизонт событий во внешний мир миллиарды лет назад (точнее, в году под номером $-\infty$).
3. В 12 ч дня он достигает максимальной высоты в 1 миллион километров над черной дырой.
4. Он пересекает горизонт событий, двигаясь внутрь, через миллиарды лет в будущем (точнее, в году под номером $+\infty$).
5. Астроном возвращается в сингулярность в 12 ч 20 мин дня.

Конечно, все согласны в том, что астроном-путешественник достигает максимальной высоты полета в 12 ч дня, т.е. в тот момент, в который синхронизуются все часы. Все также будут согласны и в том, когда астроном вылетает из сингулярности и когда он возвращается в нее. Но в остальном шварцшильдовская геометрия явно ненормальна. Вылетев из сингулярности, астроном перемещается в координатном времени *вспять во времени* до года $-\infty$. Затем он снова мчится вперед во времени, достигает максимальной высоты полета в полдень, а опускается под горизонт событий в год $+\infty$. После этого он снова перемещается *вспять во времени* и попадает в сингулярность в 12 ч 20 мин дня. На диаграмме пространства-времени его мировая линия имеет вид, показанный на рис. 9.5.

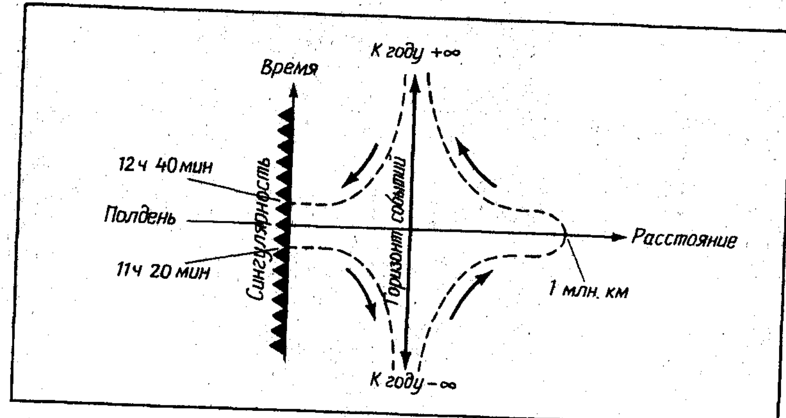


РИС. 9.5.

Путешествие в координатном времени. На этой диаграмме пространства-времени изображена траектория движения астронома из черной дыры и обратно. Он выходит через горизонт событий в отдаленном прошлом и снова пересекает горизонт событий (на этот раз внутрь) в далеком будущем.

Кое-что из этих странных выводов можно понять интуитивно. Вспомним, что с точки зрения удаленного наблюдателя (часы которого измеряют координатное время) на горизонте событий время останавливается. Вспомним также, что камень или любое другое тело, падающее на горизонт событий, *никогда* не дойдут до точки с высотой шварцшильдовского радиуса в представлении далекого наблюдателя. Поэтому падающий в черную дыру астроном не может пересечь горизонта событий вплоть до года $+\infty$, т.е. в бесконечно отдаленном будущем. Так как все путешествие симметрично относительно момента 12 ч дня (т.е. взлет и падение занимают одно и то же время), то далекие ученые *должны* наблюдать, что астроном поднимался, двигаясь к ним, в течение миллиардов лет. Он должен перейти наружу горизонт событий в год $-\infty$.

Еще непонятнее тот факт, что удаленные наблюдатели видят *двух* движущихся астрономов. Так, например, в 3 ч дня они видят одного астронома, падающего на горизонт событий (движущегося вперед во времени). Однако, согласно их же расчетам, *должен* существовать и другой астроном внутри горизонта событий, падающий на сингулярность (и движущийся вспять во времени).

Конечно, это бессмыслица. Точнее, такое странное поведение координатного времени означает, что изображенная на рис. 9.3 картина шварцшильдовской черной дыры попросту не может быть верна. Приходится поискать другие – причем их может быть множество – истинные диаграммы пространства-времени для черной дыры. В той простой диаграмме, которая показана на рис. 9.5, одни и те же области пространства-времени оказываются перекрытыми дважды, поэтому и наблюдаются сразу два астронома в то время, как на самом деле существует только один. Значит, нужно развернуть или преобразовать эту простую картинку таким образом, чтобы выявить истинную, или *глобальную*, структуру всего пространства-времени, связанного со шварцшильдовской черной дырой.

Чтобы лучше понять, как должна выглядеть эта глобальная картина, рассмотрим горизонт событий. На упрощенной двумерной диаграмме пространства-времени (см. правую сторону рис. 9.3) горизонт событий – это линия, идущая от момента $-\infty$ (отдаленное прошлое) к моменту $+\infty$ (далекое будущее) и находящаяся точно на расстоянии 1 шварцшильдовского радиуса от сингулярности. Такая линия, конечно, правильно изображает расположение поверхности сферы в обычном трехмерном пространстве. Но когда физики попробовали вычислить объем этой сферы, они, к своему изумлению, обнаружили, что он равен *нулю*. Если объем некоторой сферы равен нулю, то это, конечно, просто точка. Иными словами, физики стали подозревать, что дан-

ная «линия» на упрощенной диаграмме должна быть в глобальной картине черной дыры на самом деле точкой!

Представьте себе к тому же произвольное число астрономов, выскакивающих из сингулярности, взлетающих на разные максимальные высоты над горизонтом событий и снова падающих обратно. Вне зависимости от того, когда именно они были выброшены из сингулярности, и от того, на какую именно высоту над горизонтом событий взлетали, *все они* будут пересекать горизонт событий в моменты координатного времени $-\infty$ (на пути наружу) и $+\infty$ (на обратном пути). В результате проницательные физики также заподозрят, что эти две «точки», $+\infty$ и $-\infty$, должны быть обязательно представлены в глобальной картине черной дыры в виде двух отрезков мировых линий!

Чтобы перейти от упрощенного изображения черной дыры к ее глобальной картине, следует переделать наше упрощенное изображение в гораздо более сложную диаграмму пространства-времени. И все же нашим конечным результатом окажется новая пространственно-временная диаграмма! На этой диаграмме пространственноподобные величины будут направлены горизонтально (слева направо), а временноподобные величины – вертикально (снизу вверх). Иными словами, преобразование должно сработать так, чтобы *старые* пространственная и временная координаты были заменены на *новые* пространственную и временную координаты, которые отражали бы полностью истинную природу черной дыры.

Чтобы постараться понять, как могут быть связаны между собой старая и новая системы координат, рассмотрим некоего наблюдателя вблизи черной дыры. Чтобы избежать падения на черную дыру и оставаться на постоянном расстоянии от нее, он должен располагать мощными ракетными двигателями, выбрасывающими потоки газов вниз. В плоском пространстве-времени, вдали от тяготеющих масс, космический корабль при работающих двигателях приобрел бы *ускорение* и двигался бы все быстрее и быстрее, ибо тяга ракетных двигателей обеспечила бы ему постоянное возрастание скорости. Мировая линия такого корабля изображена на диаграмме пространства-времени на рис. 9.6. Эта линия постепенно сближается с прямой, имеющей наклон 45°, по мере того, как вследствие непрерывной работы двигателей скорость корабля приближается к скорости света. Кривая, изображающая подобную мировую линию, называется *гиперболой*. Наблюдатель, который находится близ черной дыры и пытается остаться на постоянном расстоянии от нее, будет постоянно испытывать ускорение, вызванное работой ракетных двигателей корабля. Проницательные физики заподозрят поэтому, что линии «постоянной высоты» в пересмотренной и улучшенной диаграмме пространства-времени вблизи черной дыры будут ветвями гипербол.

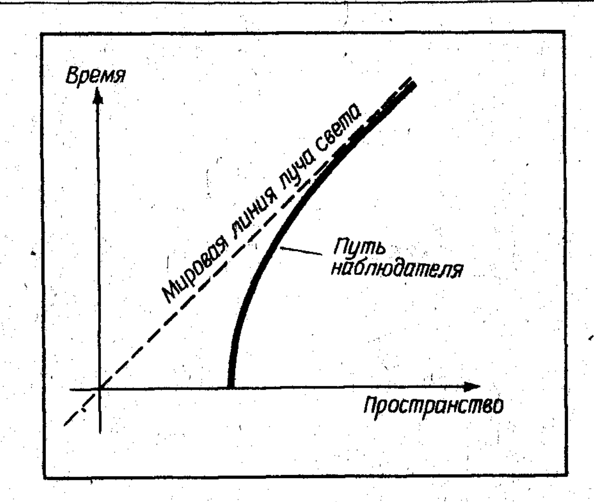


РИС. 9.6.
Ускоренно движущийся наблюдатель. Равноускоренный наблюдатель (или объект) движется все быстрее и быстрее, увеличивая скорость в постоянном темпе. Его траектория в пространстве-времени имеет вид гиперболы. По мере того как скорость наблюдателя приближается к скорости света, мировая линия приобретает наклон, все более близкий к 45°.

Наконец, тот наблюдатель, который пытается удержаться на горизонте событий, должен располагать невероятно мощными ракетными двигателями. Чтобы он не свалился внутрь черной дыры, эти двигатели должны работать с такой мощностью, что наблюдатель, будь он в плоском мире, двигался бы со скоростью света. Значит, мировые линии горизонта событий должны быть наклонены в точности под углом 45° в пересмотренной и улучшенной диаграмме пространства-времени.

В 1960 г. независимо друг от друга Крускал и Секереш нашли требуемые преобразования, переводящие старую диаграмму пространства-времени для шварцшильдовской черной дыры в новую диаграмму – пересмотренную и улучшенную. Эта новая *диаграмма Крускала – Секереша* корректно покрывает все пространство-время и полностью выявляет глобальную структуру черной дыры. При этом подтверждаются все отмеченные ранее подозрения и обнаруживаются некоторые новые удивительные и неожиданные детали. Однако, хотя преобразования Крускала и Секереша сразу переводят старую картину в новую, наглядно представить себе их лучше в виде последовательности преобразований, схематически изображенных на рис. 9.7. Конечный результат – это опять-таки диаграмма пространства-времени (пространственное направление горизонтальное, а временное – вертикальное), при-

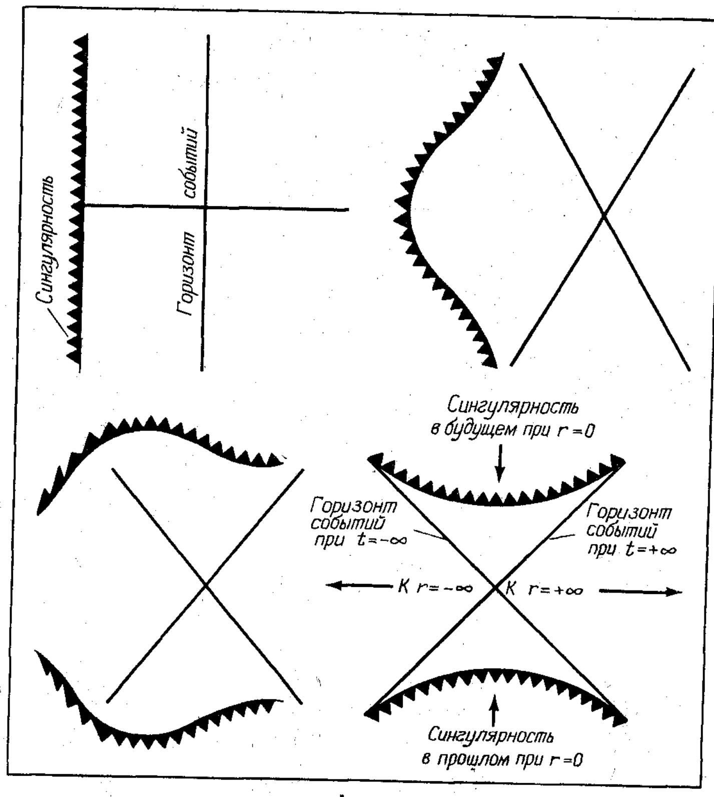


РИС. 9.7.

Переход к диаграмме Крускала–Секереша. Здесь схематически изображен переход от прежней простенькой диаграммы пространства-времени для черной дыры к гораздо более совершенной диаграмме Крускала–Секереша. Окончательная диаграмма включает две сингулярности и две внешние Вселенные.

чем лучи света, идущие к черной дыре и от нее, изображаются, как обычно, прямыми с наклоном 45°.

Конечный результат преобразования поражает и на первых порах вызывает недоверие: вы видите, что там изображены на самом деле две сингулярности, одна в прошлом, а другая в будущем; вдобавок к этому вдали от черной дыры существуют две внешние Вселенные.

Но на самом деле диаграмма Крускала–Секереша правильна, и, чтобы понять это, мы вновь рассмотрим полет астронома, выброшенного из сингулярности, пересекающего горизонт событий и снова падающего обратно. Мы уже знаем, его мировая линия на упрощенной диаграмме пространства-времени необычна. Эта линия снова изображена слева на рис. 9.8. На диаграмме же Крускала–Секереша (рис. 9.8, справа) такая линия выглядит намного осмысленнее. Наблюдатель на самом деле выскакивает из сингулярности в прошлом и в конце концов попадает в сингулярность в будущем. Следовательно, такое «аналитически полное» описание решения Шварцшильда включает *как* черную, *так* и белую дыру. Наш астроном на самом деле вылетает из белой дыры и в конце концов падает в черную дыру. Обратите внимание на то, что его мировая линия повсюду наклонена к вертикали менее чем на 45°, т.е. эта линия везде временноподобна и поэтому допустима. Сравнивая же левую и правую части рис. 9.8, вы обнаружите, что «точки» моментов времени $+\infty$ и $-\infty$ на горизонте событий теперь растянулись в две прямые линии, имеющие наклон 45°, что подтверждает наши прежние подозрения.

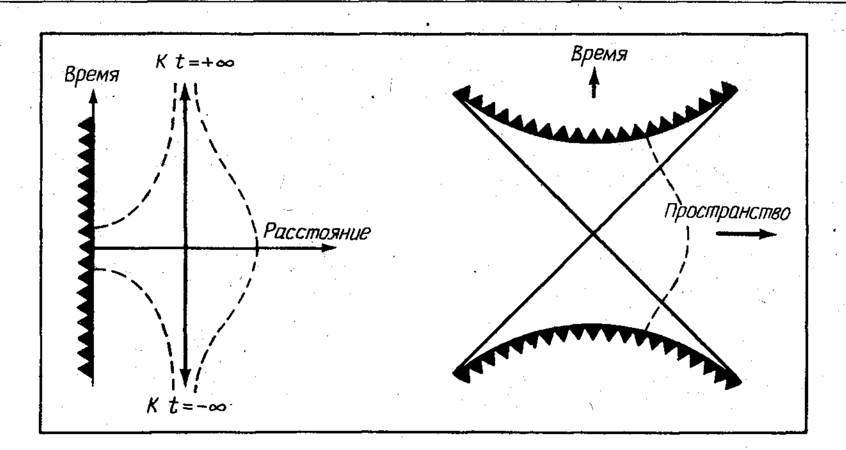


РИС. 9.8.

Мировая линия путешествия из черной дыры и обратно. На упрощенной диаграмме пространства-времени (*слева*) мировая линия астронома, вылетающего из черной дыры и падающего обратно в нее, выглядит сложно. На диаграмме Крускала–Секереша (*справа*) та же линия поддается простому истолкованию. Астроном вылетает из сингулярности в прошлом и падает в сингулярность в будущем.

При переходе к диаграмме Крускала–Секереша обнаруживается истинная природа всего пространства-времени вблизи шварцшильдовской черной дыры. На упрощенной диаграмме разные участки пространства-времени перекрывались друг с другом. Именно поэтому удаленные ученые, наблюдая падение астронома в черную дыру (или его вылет из нее), ошибочно предполагали, что имеются *два* астронома. На диаграмме Крускала–Секереша эти перекрывающиеся участки должным образом распутаны. На рис. 9.9 показано, как связаны между собой эти разные участки на обоих типах диаграмм. Внешних Вселенных на самом деле две (области I и III), как и внутренних ча-

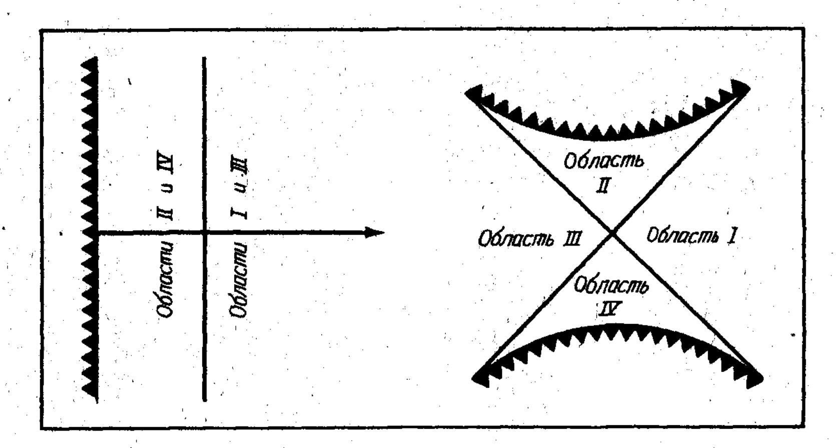


РИС. 9.9.

Области пространства-времени. На упрощенной диаграмме разные области пространства-времени накладываются друг на друга. Напротив, на диаграмме Крускала–Секереша эти области представлены раздельно.

стей черной дыры (области II и IV) между сингулярностями и горизонтом событий.

Полезно также проанализировать, как отдельные части пространственно-временной сетки преобразуются при переходе от упрощенной диаграммы к диаграмме Крускала–Секереша. В упрощенном представлении (рис. 9.10) штриховые линии постоянных высот над сингулярностью – это просто прямые, направленные вертикально. Пунктирные линии постоянного координатного времени – также прямые, но горизонтальные. Пространственно-временная сетка выглядит как кусок обычной миллиметровки.

На диаграмме Крускала–Секереша (рис. 9.11) линии постоянного времени (пунктирные) остались прямыми, но теперь они расходятся под разными углами. Линии же постоянного расстояния от черной дыры (штриховые) суть гиперболы, как мы подозревали раньше.

Анализируя рис. 9.11, можно понять, почему при переходе через горизонт событий пространство и время меняются ролями, как уже говорилось в предыдущей главе. Вспомним, что на упрощенной диаграмме (см. рис. 9.10) линии постоянного расстояния направлены по вертикали. Так, какая-то конкретная штриховая линия может изображать точку, находящуюся постоянно на высоте 10 км над черной дырой. Такая линия должна быть параллельна горизонту событий на упрощенной диаграмме, т.е. она должна быть вертикальной; поскольку она изображает нечто неподвижное во все моменты времени, то линия постоянного рас-

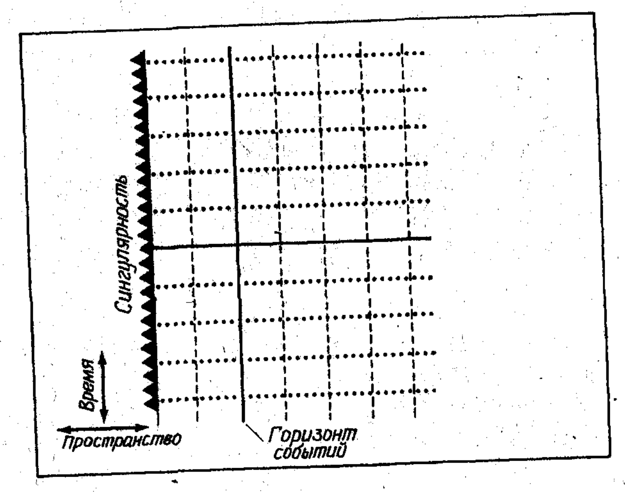


РИС. 9.10.

Пространственно-временная сетка координат на упрощенной диаграмме. При упрощенном представлении координатные линии постоянного расстояния от черной дыры (штриховые) – это просто вертикальные прямые на диаграмме. Линии постоянного времени (пунктирные) – также прямые, но уже горизонтальные.

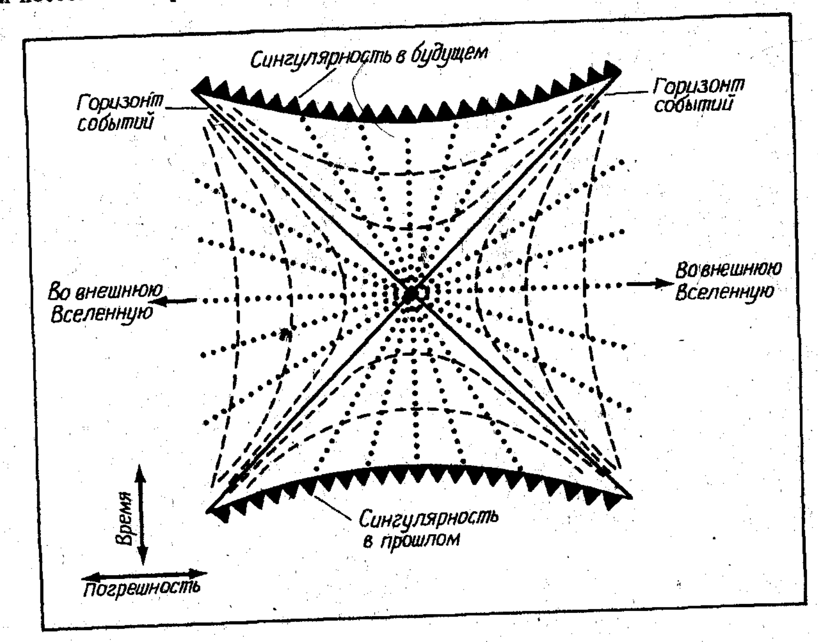


РИС. 9.11.

Пространственно-временная сетка координат на диаграмме Крускала–Секереша. Линии постоянного времени (точечные) здесь прямые, однако линии постоянного расстояния (штриховые) имеют вид гипербол. Заметна смена ролей между пространством и временем при пересечении горизонта событий.

стояния должна иметь временноподобное направление (иначе говоря, вверх) на этой упрощенной диаграмме.

На рис. 9.11 изображена диаграмма Крускала – Секереша; здесь штриховые линии постоянного расстояния имеют в общем направление вверх, если взять их достаточно далеко от черной дыры. Там они все еще временноподобные. Однако внутри горизонта событий штриховые линии постоянного расстояния ориентированы в общем горизонтально. Значит, под горизонтом событий линии постоянного расстояния имеют пространственноподобное направление! Следовательно, то, что обычно (во внешней Вселенной) связывается с расстоянием, ведет себя внутри горизонта событий подобно времени.

Аналогично этому на упрощенной диаграмме (см. рис. 9.10) линии постоянного времени горизонтальны и имеют пространственноподобное направление. Например, некая конкретная пунктирная линия может означать момент «3 ч дня для всех точек пространства». Такая линия должна быть параллельна пространственной оси на упрощенной диаграмме, т. е. она должна быть горизонтальной.

На рис. 9.11, где изображена диаграмма Крускала – Секереша, пунктирные линии постоянного времени в общем имеют пространственноподобное направление, если взять их далеко от черной дыры, т. е. они там почти горизонтальны. Но внутри горизонта событий пунктирные линии постоянного времени направлены в общем снизу вверх, т. е. ориентированы во временноподобном направлении. Итак, под горизонтом событий линии постоянного времени имеют временноподобное направление! Следовательно, то, что обычно (во внешней Вселенной) связывается со временем, ведет себя внутри горизонта событий подобно расстоянию. При пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями.

В связи с обсуждением свойств пространства и времени важно отметить, что на диаграмме Крускала – Секереша (рис. 9.11) обе сингулярности (и в прошлом, и в будущем) ориентированы горизонтально. Обе гиперболы, изображающие «точку» $r = 0$, имеют повсюду наклон *менее* 45° к вертикали. Эти линии пространственноподобные, и поэтому говорят, что шварцшильдовская сингулярность пространственноподобна.

Тот факт, что шварцшильдовская сингулярность пространственноподобна, приведет к важным заключениям. Как и в частной теории относительности (см. рис. 1.9), здесь невозможно двигаться со сверхсветовой скоростью, так что пространственноподобные мировые линии в качестве «путей» движения запрещены. Двигаться по мировым линиям, обладающим наклоном более 45° к вертикальному (временноподобному) направлению, невозможно. Поэтому невозможно попасть из нашей Вселенной (на

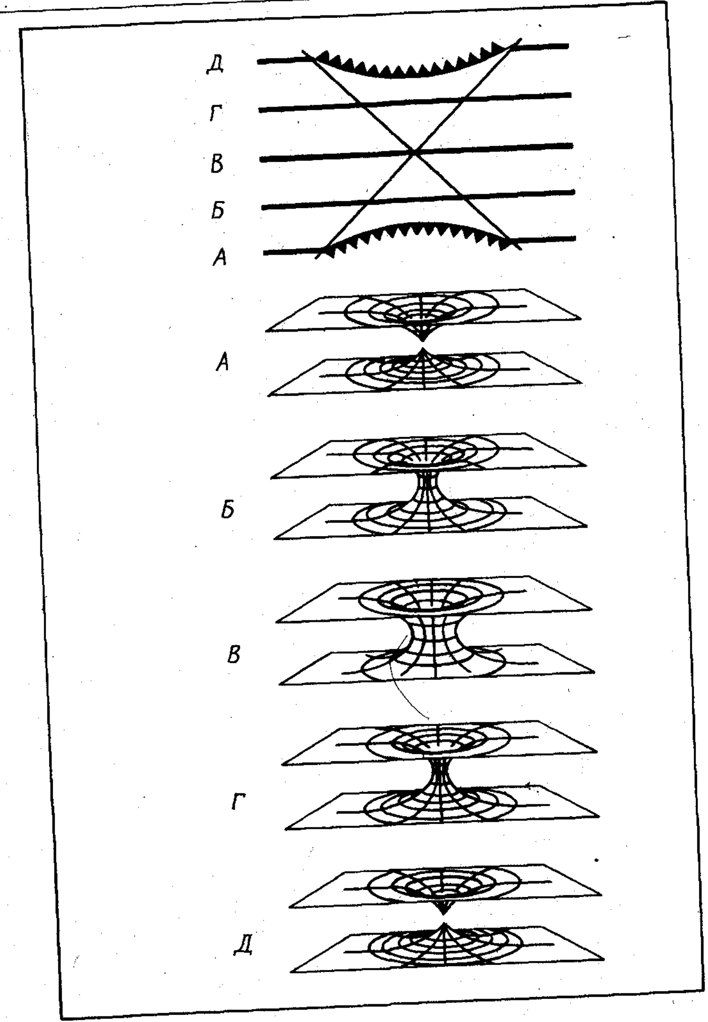


РИС. 9.12.
Диаграммы вложения для черной дыры. Чтобы построить диаграммы вложения, пространство-время Крускала–Секереша «режется ломтиками» по пяти характерным гиперповерхностям. Переходя от среза *А* (на раннем временном этапе) к срезу *Д* (на позднем этапе), можно видеть эволюцию возникающей при этом «кротовой норы».

диаграмме Крускала – Секереша справа) в другую Вселенную (на этой же диаграмме слева). Любой путь, связывающий друг с другом обе Вселенные, должен хотя бы в одном месте быть пространственноподобным, а такие пути запрещены для движения. Кроме того, так как горизонт событий наклонен в точности под

углом 45°, то астроном из нашей Вселенной, опустившийся под этот горизонт, никогда больше не сможет из-под него выйти. Например, если кто-нибудь проникнет в область II на рис. 9.9, то *все* допустимые временноподобные мировые линии приведут его прямо в сингулярность. Шварцшильдовская черная дыра – это ловушка без выхода.

Чтобы полнее почувствовать природу геометрии Крускала – Секереша, поучительно рассмотреть пространственноподобные срезы диаграммы пространства-времени, выполненные этими авторами. Это будут *диаграммы вложения* искривленного пространства вблизи черной дыры. Такой метод получения срезов пространства-времени по пространственноподобным гиперповерхностям применялся нами и ранее (см. рис. 5.9, 5.10 и 5.11) и облегчил понимание свойств пространства в окрестностях Солнца.

На рис. 9.12 изображена диаграмма Крускала – Секереша, «нарезанная ломтиками» по характерным пространственноподобным гиперповерхностям. Срез *А* относится к раннему моменту времени. Первоначально две Вселенные, находящиеся вне черной дыры, никак не связаны между собой. На пути от одной Вселенной к другой пространственноподобный срез наталкивается на сингулярность. Поэтому диаграмма вложения для среза *А* описывает две раздельные Вселенные (изображенные в виде двух параллельных друг другу асимптотически плоских листов), в каждой из которых имеется сингулярность. Позднее при дальнейшей эволюции этих Вселенных сингулярности соединяются и возникает мостик, в котором сингулярностей уже нет. Это соответствует срезу *Б*, куда сингулярность не входит. С течением времени этот мостик, или «*кротовая нора*», расширяется и достигает наибольшего поперечника, равного двум шварцшильдовским радиусам (момент, соответствующий срезу *В*). Позднее мостик начинает снова стягиваться (срез *Г*) и наконец разрывается (срез *Д*), так что мы имеем снова две раздельные Вселенные. Такая эволюция кротовой норы (рис. 9.12) занимает менее 1/10000 с, если черная дыра имеет массу Солнца.

Обнаружение Крускалом и Секерешем подобной глобальной структуры пространства-времени у черной дыры явилось решающим прорывом на фронте теоретической астрофизики. Впервые удалось построить диаграммы, полностью изображающие все области пространства и времени. Но после 1960 г. были достигнуты и новые успехи, прежде всего Роджером Пенроузом. Хотя на диаграмме Крускала – Секереша и представлена вся история, эта диаграмма простирается вправо и влево бесконечно далеко. Например, наша Вселенная простирается на бесконечное расстояние вправо на диаграмме Крускала – Секереша, тогда как влево на той же диаграмме до бесконечности уходит пространство-вре-

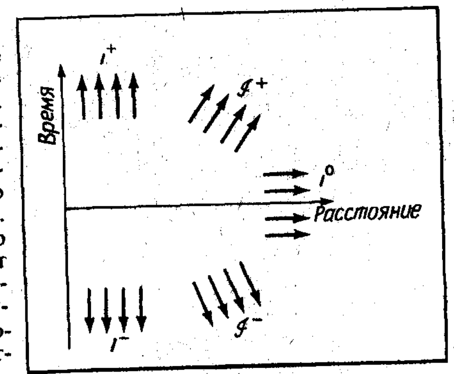


РИС. 9.13.
Бесконечности. Наиболее удаленные «окраины» пространства-времени (бесконечности) делятся на пять типов. Временноподобная бесконечность прошлого (I^-) – та область, откуда приходят все материальные тела, а временноподобная бесконечность будущего (I^+) – та область, куда они все уходят. Световая бесконечность прошлого ($\mathcal{I}^-$) – та область, откуда приходят световые лучи, а световая бесконечность будущего – та область ($\mathcal{I}^+$), куда они уходят. Ничто (кроме тахионов) не может попасть в пространственноподобную бесконечность (I^0).

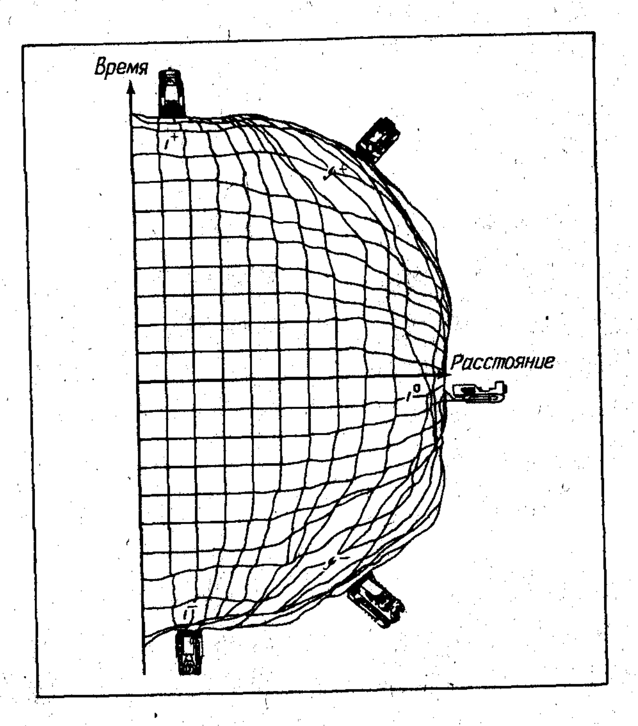


РИС. 9.14.
Конформное отображение по Пенроузу. Существует математический прием, при помощи которого удается «стянуть» наиболее удаленные окраины пространства-времени (все пять бесконечностей) во вполне обозримую конечную область.

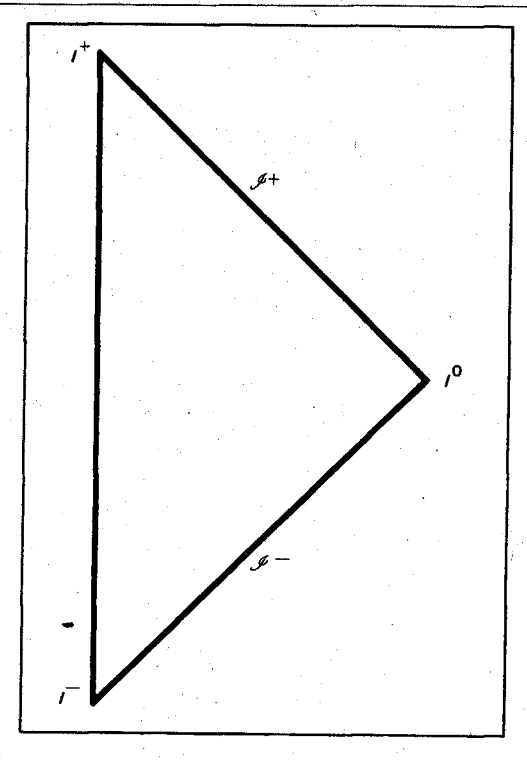


РИС. 9.15.
Диаграмма Пенроуза для плоского пространства-времени. Все пространство-время собрано внутрь треугольника с помощью способа конформного отображения, придуманного Пенроузом. Из пяти бесконечностей три (I^-, I^0, I^+) сжаты до отдельных точек, а две – световые бесконечности $\mathscr{I}^-$ и $\mathscr{I}^+$ – стали прямыми линиями, имеющими наклон 45°.

мя «другой» асимптотически плоской Вселенной, которая параллельна нашей. Пенроуз первым понял, насколько полезно и поучительно было бы пользоваться «картой», отображающей эти бесконечные просторы на какие-то конечные области, по которым было бы возможно точно судить о происходящем вдали от черной дыры. Чтобы осуществить эту идею, Пенроуз привлек так называемые методы *конформного отображения*, с помощью которых все пространство-время, включая полностью и обе Вселенные, изображается на одной конечной диаграмме.

Чтобы познакомить вас с методами Пенроуза, обратимся к обычному плоскому пространству-времени типа изображенного на рис. 9.2. Все пространство-время там сосредоточено на правой стороне диаграммы просто потому, что невозможно оказаться на отрицательном расстоянии от произвольного начала. Вы можете находиться от него, скажем, в 2 м, но уж никак не

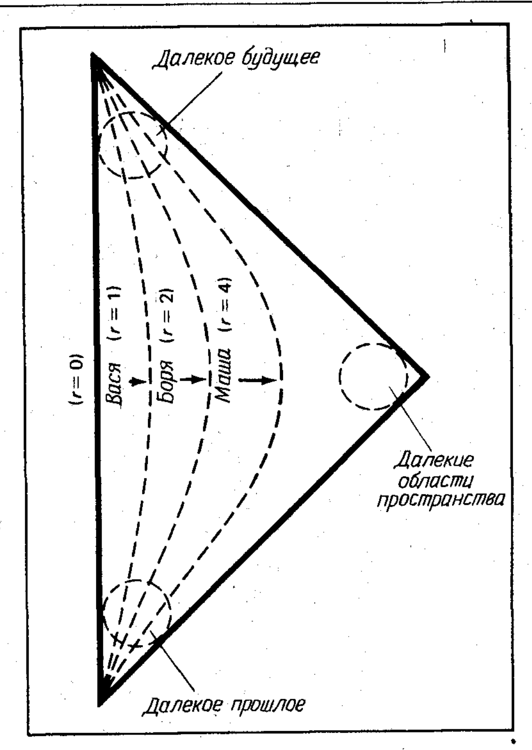


РИС. 9.16.
Пример конформной диаграммы Пенроуза. Эта диаграмма изображает фактически то же, что и рис. 9.2. Однако на конформной диаграмме мировые линии объектов представлены полностью (от удаленного прошлого I^- до далекого будущего I^+).

в минус 2 м. Вернемся к рис. 9.2. Мировые линии Бори, Васи и Маши изображены там лишь на ограниченной области пространства-времени ввиду ограниченности размеров страницы. Если вам захочется посмотреть, где будут Боря, Вася и Маша через тысячу лет или где они были миллиард лет назад, вам понадобится намного бо́льший лист бумаги. Гораздо удобнее было бы изобразить все эти далекие от точки «здесь и теперь» положения (события) на компактной, небольшой диаграмме.

Мы уже встречались с тем, что «самые удаленные» области пространства-времени именуются *бесконечностями.* Эти области крайне далеки от «здесь и теперь» в пространстве или во времени (последнее означает, что они могут находиться в очень далеком будущем или очень далеком прошлом). Как видно из рис. 9.13, может быть пять типов бесконечностей. Прежде всего это I^- – *времениподобная бесконечность в прошлом.* Она является тем «местом», откуда произошли все материальные объекты (Бо-

ря, Вася, Маша, Земля, галактики и все прочее). Все такие объекты движутся по временноподобным мировым линиям и должны уйти в I^+ – *временноподобную бесконечность будущего*, куда-то в миллиарды лет после «теперь». Кроме того, имеется I^0 – *пространственноподобная бесконечность*, и так как ничто не может двигаться быстрее света, то ничто (кроме разве тахионов) не может никогда попасть в I^0. Если быстрее света не движется никакой из известных физике объектов, то фотоны движутся в точности со скоростью света по мировым линиям, наклоненным на 45° на диаграмме пространства-времени. Это дает возможность ввести $\mathscr{I}^-$ – *световую бесконечность прошлого*, откуда приходят все световые лучи. Существует, наконец, и $\mathscr{I}^+$ – *световая бесконечность будущего* (куда уходят все световые лучи). Всякая удаленная область пространства-времени принадлежит одной из этих пяти бесконечностей; I^-, $\mathscr{I}^-$, I^0, $\mathscr{I}^+$ или I^+.

Метод Пенроуза сводится к математическому приему стягивания всех этих бесконечностей на один и тот же лист бумаги. Преобразования, осуществляющие такое стягивание, действуют наподобие бульдозеров (см. образное представление этих преобразований на рис. 9.14), сгребающих наиболее удаленные участки пространства-времени туда, где их можно лучше рассмотреть. Результат такого преобразования представлен на рис. 9.15. Следует иметь в виду, что линии постоянного расстояния от произвольной точки отсчета в основном вертикальные

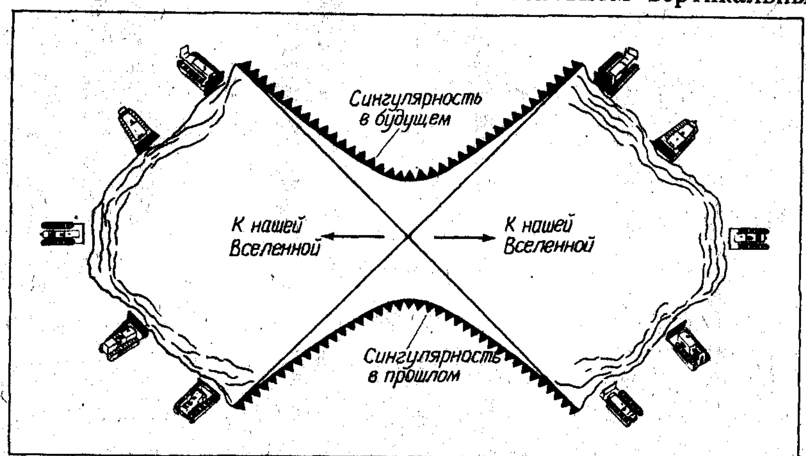


РИС. 9.17.

Конформное отображение черной дыры. Все пространство-время, связанное с шварцшильдовской черной дырой, может быть конформно отображено на один листок бумаги с помощью способа Пенроуза. Этот способ сводится к стягиванию всего пространства-времени в обозримую область, где его можно исследовать.

и всегда указывают временноподобное направление. Линии постоянного времени в основном горизонтальные и всегда указывают пространственноподобное направление.

На *конформной* карте всего плоского пространства-времени (рис. 9.15) пространство-время как целое уместилось в треугольнике. Вся временноподобная бесконечность в прошлом (I^-) собрана в одну-единственную точку внизу диаграммы. Все временноподобные мировые линии всех материальных объектов выходят из этой точки, изображающей чрезвычайно удаленное прошлое. Вся временноподобная бесконечность в будущем (I^+) собрана в одну-единственную точку вверху диаграммы. Временноподобные мировые линии всех материальных объектов во Вселенной в конце концов упираются в эту точку, изображающую далекое будущее. Пространственноподобная бесконечность (I^0) собрана в точку справа на диаграмме. Ничто (кроме тахионов) никогда не может попасть в I^0. Световые бесконечности в прошлом и в будущем $\mathscr{I}^-$ и $\mathscr{I}^+$ превратились в прямые с наклоном 45°, ограничивающие диаграмму справа вверху и справа внизу по диагоналям. Световые лучи всегда идут по мировым линиям с наклоном 45°, так что свет, приходящий из удаленного прошлого, начинает свой путь где-то на $\mathscr{I}^-$, а уходящий в далекое будущее кончает свой путь где-то на $\mathscr{I}^+$. Вертикальная прямая,

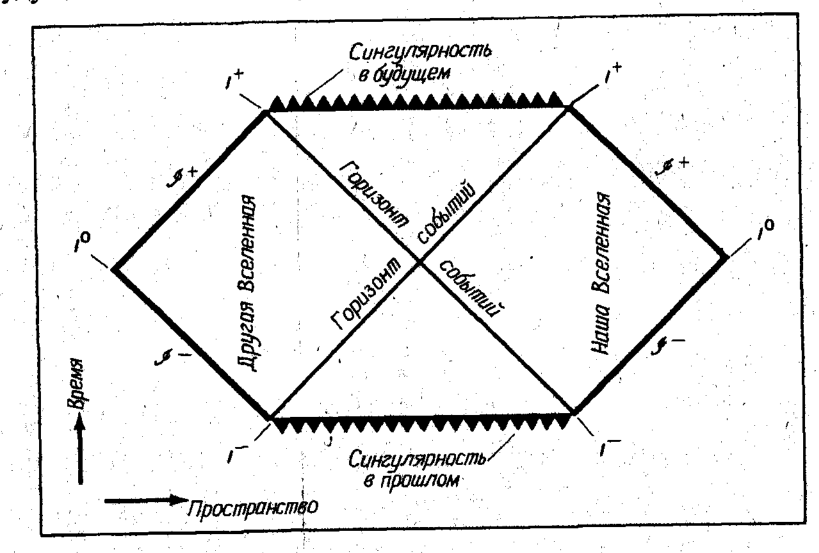


РИС. 9.18.

Диаграмма Пенроуза для шварцшильдовской черной дыры. По существу, это то же, что и диаграмма Крускала–Секереша, изображенная на рис. 9.11. Однако здесь можно видеть и наиболее удаленные окраины двух Вселенных (I^-, $\mathscr{I}^-$, I^0, $\mathscr{I}^+$ и I^+ для каждой из них).

ограничивающая диаграмму слева,–это просто времениподобная мировая линия выбранной нами произвольной начальной точки отсчета ($r = 0$).

Чтобы покончить с описанием конформной диаграммы Пенроуза плоского пространства-времени, мы изобразили на рис. 9.16 полностью мировые линии Бори, Васи и Маши. Сравните эту диаграмму с рис. 9.2–ведь это одно и то же, только на конформной диаграмме мировые линии прослеживаются на всем их протяжении (от удаленного прошлого I^- до далекого будущего I^+).

Изображение обычного плоского пространства-времени по способу Пенроуза не дает ничего сенсационного. Однако способ Пенроуза применим и к черным дырам! В частности, диаграмму Крускала–Секереша (см. рис. 9.11) можно отобразить конформно таким образом, что физик увидит *все* пространство-время всех Вселенных изображенным на одном-единственном листке бумаги. Как это наглядно изображено на рис. 9.17, конформные преобразования Пенроуза здесь снова работают подобно бульдозерам, «сгребающим» пространство-время. Окончательный результат показан на рис. 9.18.

На диаграмме Пенроуза шварцшильдовской черной дыры (рис. 9.18) мы снова замечаем, что линии постоянного времени и линии постоянного расстояния ведут себя, по существу, так же, как и на диаграмме Крускала–Секереша. Горизонт событий сохраняет свой наклон в 45°, а сингулярности (как в прошлом, так и в будущем) остаются пространственноподобными. Обмен ролями между пространством и временем, как и прежде, происходит при пересечении горизонта событий. Однако теперь самые удаленные части обеих связанных с черной дырой Вселенных находятся у нас перед глазами. Все пять бесконечностей нашей Вселенной (I^-, $\mathscr{I}^-$, I^0, $\mathscr{I}^+$, I^+) видны справа на диаграмме, а слева на ней же можно увидеть все пять бесконечностей другой Вселенной (I^-, $\mathscr{I}^-$, I^0, $\mathscr{I}^+$, I^+).

Мы можем теперь перейти к заключительному упражнению с шварцшильдовской черной дырой–выяснить, что увидят отчаянно любознательные астрономы-камикадзе, падающие на черную дыру и *пересекающие* горизонт событий.

Космический корабль этих астрономов изображен на рис. 9.19. Носовой иллюминатор всегда направлен прямо на сингулярность, а кормовой–в противоположную сторону, т.е. на нашу внешнюю Вселенную. Отметим, что у космического корабля теперь нет ракетных двигателей для замедления его падения. Начав движение с большой высоты над черной дырой, астрономы просто вертикально падают со все увеличивающейся (по их измерениям) скоростью. Их мировая линия (рис. 9.20) проходит сначала через горизонт событий, а затем ведет в сингулярность. Так как их скорость всегда меньше скорости света, то мировая линия

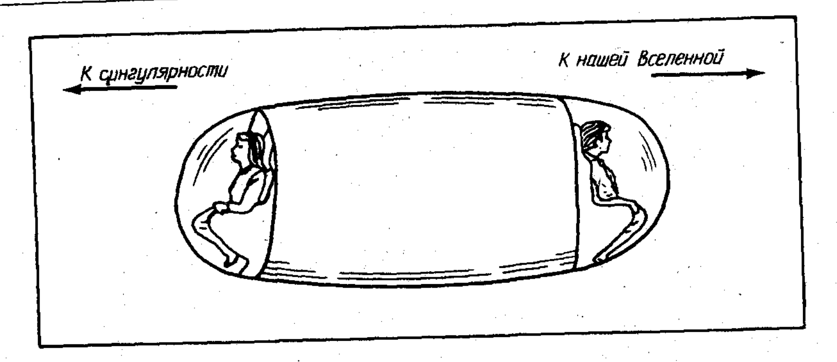


РИС. 9.19.
Космический корабль. Два любознательных и отчаянно смелых астронома полетели на этом корабле к черной дыре. Обратите внимание на то, что у этого корабля нет ракетных двигателей, которые замедлили бы его свободное падение. Носовой иллюминатор смотрит на центр черной дыры, а кормовой иллюминатор–на внешнюю Вселенную.

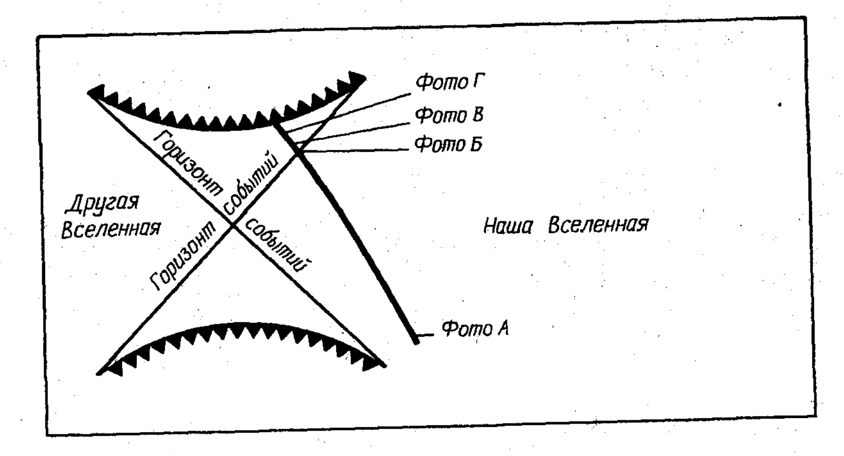


РИС. 9.20.
Полет «камикадзе». Диаграмма Пенроуза изображает мировую линию полета астрономов к черной дыре, заканчивающегося их гибелью. В ходе полета снимаются четыре пары фотографий. Первый снимок (*А*) сделан далеко от черной дыры. Второй снимок (*Б*) соответствует моменту, когда астрономы пересекали горизонт событий. Третий снимок (*В*) сделан между горизонтом событий и сингулярностью. Последняя фотография (*Г*) снята непосредственно перед попаданием в сингулярность.

корабля на диаграмме Пенроуза должна быть времениподобной, т.е. повсюду обладать наклоном к вертикали менее 45°.

Во время путешествия астрономы делают на разных этапах пути четыре пары фотографий–по одной из каждого иллюминатора. Первая пара (снимки *А*) сделана, когда они были еще очень

РИС. 9.21.

Фото А. Далеко от черной дыры. С большого расстояния черная дыра выглядит как маленькое черное пятнышко в центре поля зрения носового иллюминатора. Падающие в дыру астрономы наблюдают через кормовой иллюминатор неискаженный вид Вселенной, из которой они прилетели.

Фото Б. На горизонте событий. Благодаря эффекту аберрации изображение черной дыры сжато в сторону центра поля зрения носового иллюминатора. Астроном, ведущий наблюдение в кормовой иллюминатор, видит лишь ту Вселенную, из которой прибыл корабль.

далеко от черной дыры. На рис. 9.21,*А* видно черную дыру как маленькое пятнышко в центре поля зрения носового иллюминатора. Хотя в непосредственной близости от черной дыры вид неба искажен, его остальная часть выглядит совершенно обычно. По мере того как скорость падения астрономов на черную дыру возрастает, свет от объектов из удаленной Вселенной, наблюдаемый через кормовой иллюминатор, испытывает все более и более сильное красное смещение.

Хотя, по утверждению удаленных наблюдателей, падение космического корабля замедляется до полной его остановки на горизонте событий, астрономы на *самом* космическом корабле ничего подобного не заметят. По их мнению, скорость корабля все время возрастает и при пересечении горизонта событий она составляет заметную долю скорости света. Это существенно по той причине, что в результате падающие астрономы наблюдают явление аберрации света звезд, очень похожее на рассмотренное нами в гл. 3 (см. рис. 3.9, 3.11). Вспомните, что при движении с околосветовой скоростью вы заметите сильные искажения картины неба. В частности, изображения небесных тел как бы собираются впереди движущегося наблюдателя. Вследствие этого эффекта изображение черной дыры концентрируется ближе к середине носового иллюминатора падающего космического корабля.

Картина, наблюдаемая падающими астрономами с горизонта событий, показана на рис. 9.21,*Б*. Этот и последующие рисунки построены на основании расчетов, проделанных Кэннингэмом в Калифорнийском технологическом институте в 1975 г. Если бы астрономы покоились, изображение черной дыры занимало бы все поле зрения носового иллюминатора (рис. 8.15,*Д*). Но так как они движутся с большой скоростью, изображение сосредоточивается в середине носового иллюминатора. Его угловой поперечник примерно равен 80°. Вид неба рядом с черной дырой очень сильно искажен, а астроном, ведущий наблюдение через кормовой иллюминатор, видит лишь ту Вселенную, из которой они прилетели.

Для понимания того, что же будет видно, когда корабль будет находиться *внутри* горизонта событий, вернемся к диаграм-

Фото В. Между горизонтом событий и сингулярностью. Опустившись под горизонт событий, астроном, наблюдающий в носовой иллюминатор, может видеть другую Вселенную. Приходящий из области другой Вселенной свет заполняет центральную часть его поля зрения.

Фото Г. Непосредственно над сингулярностью. Когда астрономы приближаются к сингулярности, через носовой иллюминатор становится все лучше видно другую Вселенную. Изображение же собственно черной дыры (имеющее вид кольца) становится все тоньше и тоньше, быстро приближаясь к краю поля зрения носового иллюминатора.

ме Пенроуза шварцшильдовской черной дыры (см. рис. 9.18 или 9.20). Вспомним, что идущие в черную дыру световые лучи имеют на этой диаграмме наклон 45°. Поэтому, оказавшись под горизонтом событий, астрономы смогут видеть и другую Вселенную. Лучи света из удаленных частей другой Вселенной (т.е. из ее бесконечности $\mathscr{I}^-$ в левой части диаграммы Пенроуза) смогут теперь дойти до астрономов. Как показано на рис. 9.21,*В*, в центре поля зрения носового иллюминатора космического корабля, находящегося между горизонтом событий и сингулярностью, видна другая Вселенная. Черная часть дыры представляется теперь в виде *кольца*, отделяющего изображение нашей Вселенной от изображения другой Вселенной. По мере приближения падающих наблюдателей к сингулярности черное кольцо становится все тоньше, прижимаясь к самому краю поля зрения носового иллюминатора. Вид неба из точки прямо над сингулярностью показан на рис. 9.21,*Г*. В носовой иллюминатор становится все лучше и лучше видно другую Вселенную, а прямо на сингулярности ее вид целиком заполняет поле зрения носового иллюминатора. Астроном же, проводящий наблюдения через кормовой иллюминатор, видит на протяжении всего полета лишь нашу внешнюю Вселенную, хотя ее изображение становится все более и более искаженным.

Падающие астрономы отметят еще один важный эффект, который не отражен на «снимках» 9.21,*А*–*Г*. Вспомним, что свет, уходящий из окрестностей горизонта событий в удаленную Вселенную, претерпевает сильнейшее красное смещение. Это явление, называемое *гравитационным красным смещением*, мы обсуждали в гл. 5 и 8. Красное смещение света, приходящего из области с сильным гравитационным полем, соответствует потере им энергии. Обратно, когда свет «падает» на черную дыру, он испытывает *фиолетовое смещение* и приобретает энергию. Приходящие из удаленной Вселенной туда слабые радиоволны превращаются, например, в мощные рентгеновские или гамма-лучи непосредственно над горизонтом событий. Если описываемые диаграммами Пенроуза типа изображенной на рис. 9.18 черные дыры *действительно* существуют в природе, то свет, падающий на них из $\mathscr{I}^-$, скапливается в течение миллиардов лет около горизонта событий. Этот падающий свет приобретает чудовищную энергию, и когда астрономы опускаются под горизонт событий, они встречаются поэтому с неожиданной резкой вспышкой рентгеновских и гамма-лучей. Тот свет, который приходит из области $\mathscr{I}^-$ другой Вселенной и собирается около горизонта событий, образует, как говорят, *фиолетовый слой*. Как мы увидим в гл. 13, существование таких фиолетовых слоев весьма существенно для серых и белых дыр.

10

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ

Анализ эволюции звезд привел астрономов к заключению, что как в нашей Галактике, так и вообще во Вселенной могут существовать черные дыры. В двух предыдущих главах мы рассмотрели ряд свойств самых простых черных дыр, которые описываются тем решением уравнения гравитационного поля, которое нашел Шварцшильд. Шварцшильдовская черная дыра характеризуется только массой; электрического заряда у нее нет. У нее отсутствует также магнитное поле и вращение. Все свойства шварцшильдовской черной дыры однозначно определяются заданием *одной только массы* той звезды, которая, умирая, превращается в черную дыру в ходе гравитационного коллапса.

Нет сомнений, что решение Шварцшильда – чересчур простой случай. *Настоящая* черная дыра должна по крайней мере вращаться. Однако сколь сложной может быть черная дыра на самом деле? Какие добавочные подробности следует учесть, а какими можно пренебречь при полном описании той черной дыры, которую можно обнаружить при наблюдениях неба?

Представим себе массивную звезду, у которой только что кончились все ресурсы ядерной энергии и у которой вот-вот начнется фаза катастрофического гравитационного коллапса. Можно думать, что такая звезда обладает очень сложной структурой и при ее всестороннем описании пришлось бы учитывать множество характеристик. В принципе астрофизик способен рассчитать химический состав всех слоев такой звезды, изменение температуры от ее центра до поверхности и получить все данные о состоянии вещества в недрах звезды (например, его плотности и давления) на всевозможных глубинах. Такие расчеты сложны, и их результаты существенно зависят от всей истории развития звезды. Внутреннее строение звезд, образовавшихся из разных облаков газа и в разное время, заведомо должно быть различным.

Однако, несмотря на все эти осложняющие обстоятельства, существует один бесспорный факт. Если масса умирающей звезды превышает примерно три массы Солнца, эта звезда *непре-*

менно превратится в черную дыру в конце своего жизненного цикла. Не существует таких физических сил, которые могли бы предотвратить коллапс столь массивной звезды.

Чтобы лучше осознать смысл этого утверждения, вспомним, что черная дыра – это столь искривленная область пространства-времени, что из нее ничто не может вырваться, даже свет! Другими словами, из черной дыры невозможно получить никакую информацию. Как только вокруг умирающей массивной звезды возник горизонт событий, становится невозможным выяснить какие бы то ни было детали того, что происходит под этим горизонтом. Наша Вселенная навсегда теряет доступ к информации о событиях под горизонтом событий. Поэтому черную дыру иногда называют *могилой для информации.*

Хотя при коллапсе звезды с появлением черной дыры и теряется огромное количество информации, все же некоторая информация извне остается. Например, сильнейшее искривление пространства-времени вокруг черной дыры указывает, что здесь умерла звезда. С массой мертвой звезды прямо связаны такие конкретные свойства дыры, как поперечник фотонной сферы или горизонта событий (см. рис. 8.4 и 8.5). Хотя сама дыра в буквальном смысле черная, космонавт еще издалека обнаружит ее существование по гравитационному полю дыры. Измерив, насколько траектория его космического корабля отклонилась от прямолинейной, космонавт может точно вычислить полную массу черной дыры. Таким образом, масса черной дыры – это один из элементов информации, который не теряется при коллапсе.

Чтобы подкрепить это утверждение, рассмотрим пример двух одинаковых звезд, образующих при коллапсе черные дыры. На одну звезду поместим тонну камней, а на другую – слона весом в одну тонну. После образования черных дыр измерим напряженность гравитационного поля на больших расстояниях от них, скажем, по наблюдениям орбит их спутников или планет. Окажется, что напряженности обоих полей одинаковы. На очень больших расстояниях от черных дыр для вычисления полной массы каждой из них можно воспользоваться ньютоновской механикой и законами Кеплера. Так как полные суммы масс входящих в каждую из черных дыр составных частей одинаковы, идентичными окажутся и результаты. Но что еще существеннее, это невозможность указать, какая из этих дыр поглотила слона, а какая – камни. Вот эта информация пропала навсегда. Тонну чего бы вы ни бросили в черную дыру, результат всегда будет одним и тем же. Вы сможете определить, какую массу вещества поглотила дыра, но сведения о том, какой формы, какого цвета, какого химического состава было это вещество, утрачиваются навсегда.

Полную массу черной дыры всегда можно измерить, поскольку гравитационное поле дыры влияет на геометрию пространства и времени на огромных расстояниях от нее. Находящийся далеко от черной дыры физик может поставить эксперименты по измерению этого гравитационного поля, например запустив искусственные спутники и наблюдая их орбиты. Это важный источник информации, позволяющий физику с уверенностью говорить, что именно черная дыра *не* поглотила. В частности, все, что может измерить этот гипотетический исследователь вдали от черной дыры, *не было* поглощено полностью.

Начиная в середине XIX в. разработку теории электромагнетизма, Джеймс Клерк Максвелл располагал большими количествами информации об электрическом и магнитном полях. В частности, удивительным был тот факт, что электрические и магнитные силы убывают с расстоянием в точности так же, как и сила тяжести. И гравитационные, и электромагнитные силы – это силы *большого радиуса действия.* Их можно ощутить на очень большом удалении от их источников. Напротив, силы, связывающие воедино ядра атомов, – силы сильного и слабого взаимодействий – имеют *короткий радиус действия.* Ядерные силы дают о себе знать лишь в очень малой области, окружающей ядерные частицы.

Большой радиус действия электромагнитных сил означает, что физик, находясь далеко от черной дыры, может предпринять эксперименты для выяснения, *заряжена* эта дыра или нет. Если у черной дыры имеется электрический заряд (положительный или отрицательный) или магнитный заряд (соответствующий северному или южному магнитному полюсу), то находящийся вдалеке физик способен при помощи чувствительных приборов обнаружить существование этих зарядов. Таким образом, кроме информации о массе не теряется также информация о *заряде* черной дыры.

Существует третий (и последний) важный эффект, который может измерить удаленный физик. Как будет видно из следующей главы, любой вращающийся объект стремится вовлечь во вращение окружающее его пространство-время. Это явление называется *эффектом Лензе – Тирринга* или эффектом увлечения инерциальных систем. Наша Земля при вращении тоже увлекает за собой пространство и время, но в очень малой степени. Но для быстро вращающихся массивных объектов этот эффект становится заметнее, и если черная дыра образовалась из *вращающейся* звезды, то увлечение пространства-времени вблизи нее будет вполне ощутимым. Физик, находящийся в космическом корабле вдали от этой черной дыры, заметит, что он постепенно вовлекается во вращение вокруг дыры в ту же сторону, в которую вращается она сама. И чем ближе к вращающейся черной дыре окажется наш физик, тем сильнее будет это вовлечение.

Рассматривая любое вращающееся тело, физики часто гово-

рят о его *моменте количества движения*; это – величина, определяемая как массой тела, так и скоростью его вращения. Чем быстрее вращается тело, тем больше его момент количества движения. Помимо массы и заряда момент количества движения черной дыры является той ее характеристикой, информация о которой не теряется.

В конце 1960-х – начале 1970-х годов астрофизики-теоретики упорно трудились над проблемой: информация о каких свойствах черных дыр сохраняется, а о каких – теряется в них? Плодом их усилий оказалась знаменитая теорема о том, что «у черной дыры нет волос», впервые сформулированная Джоном Уилером из Принстонского университета (США). Мы уже видели, что характеристики черной дыры, которые могут быть измерены удаленным наблюдателем, – это ее масса, ее заряд и ее момент количества движения. Эти три основные характеристики сохраняются при образовании черной дыры и определяют геометрию пространства-времени вблизи нее. Работами Стивена Хоукинга, Вернера Израэла, Брандона Картера, Дэвида Робинсона и других исследователей было показано, что *только* эти характеристики сохраняются при образовании черных дыр. Иными словами, если задать массу, заряд и момент количества движения черной дыры, то о ней уже будет известно все – у черных дыр нет иных свойств, кроме массы, заряда и момента количества движения. Таким образом, черные дыры – это очень простые объекты; они гораздо проще, чем звезды, из которых черные дыры возникают. Для полного описания звезды требуется знание большого количества характеристик, таких, как химический состав, давление, плотность и температура на разных глубинах. Ничего подобного у черной дыры нет (рис. 10.1). Право же, у черной дыры совсем нет волос!

Поскольку черные дыры полностью описываются тремя параметрами (массой, зарядом и моментом количества движения), то должно существовать лишь несколько решений уравнений гравитационного поля Эйнштейна, причем каждое описывает свой «добропорядочный» тип черных дыр. Например, в предыдущих двух главах мы рассмотрели простейший тип черной дыры; эта дыра имеет лишь массу, и ее геометрия определяется решением Шварцшильда. Решение Шварцшильда было найдено в 1916 г., и хотя с тех пор было получено много других решений для черных дыр, обладающих только массой, *все* они оказались ему эквивалентными.

Невозможно представить себе, как могли бы черные дыры образоваться без вещества. Поэтому у любой черной дыры должна быть масса. Но вдобавок к массе у дыры могли бы существовать электрический заряд или вращение или и то, и другое вместе. Между 1916 и 1918 гг. Г. Райснер и Г. Нордстрём нашли

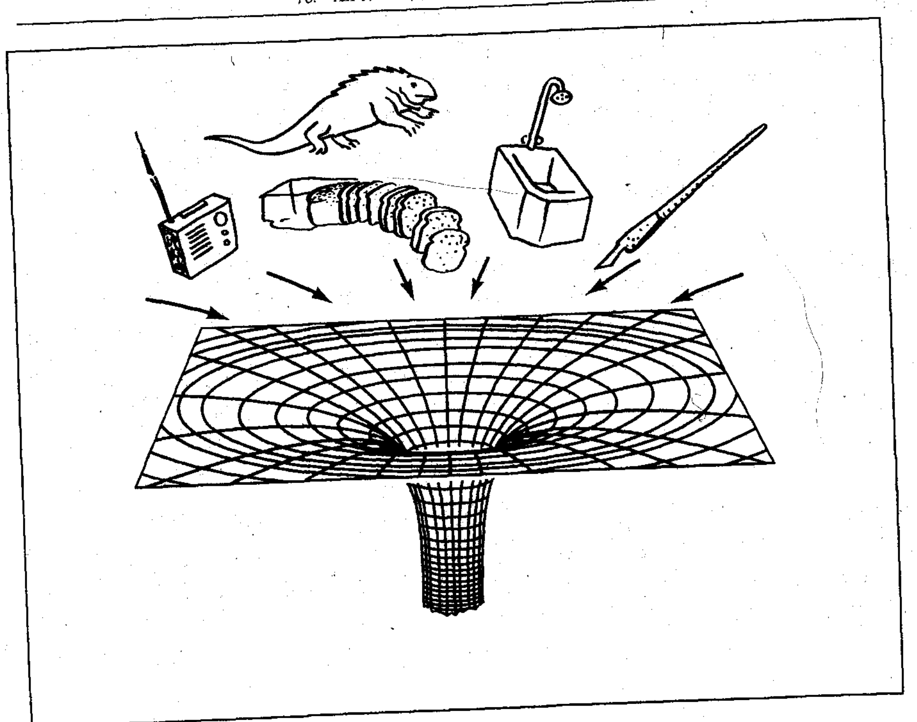


РИС. 10.1.
«У черной дыры нет волос!» Почти всякая информация о телах, падающих в черную дыру, теряется навсегда. Избегают «переваривания» дырой только масса, заряд и момент количества движения падающих в нее объектов. Это значит, что черные дыры – очень простые объекты. Их полное описание характеризуется всего тремя параметрами – массой, зарядом и моментом импульса. (По Дж. Уилеру.)

решение уравнений поля, описывающее черную дыру с массой и зарядом. Следующий шаг на этом пути задержался до 1963 г., когда Рой П. Керр нашел решение для черной дыры, обладающей массой и моментом количества движения. Наконец, в 1965 г. Ньюмэн, Коч, Чиннапаред, Экстон, Пракаш и Торренс опубликовали решение для самого сложного типа черной дыры, а именно для дыры с массой, зарядом и моментом количества движения. Каждое из этих решений единственно – других возможных решений нет. Черная дыра характеризуется, самое большее, *тремя параметрами* – массой (обозначаемой через M), зарядом (электрическим или магнитным, обозначается через Q) и моментом количества движения (обозначается через a). Все эти возможные решения сведены в табл. 10.1.

Геометрия черной дыры решающим образом зависит от вве-

Таблица 10.1

РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПОЛЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ.

Типы черной дыры	Описание черной дыры	Название решения	Год получения
Только масса (параметр M)	Самая «простая» черная дыра. Обладает лишь массой. Сферически симметрична	Решение Шварцшильда	1916
Масса и заряд (параметры M, Q)	Заряженная черная дыра. Обладает массой и зарядом (электрическим или магнитным). Сферически симметрична	Решение Райснера–Нордстрёма	1916 и 1918
Масса и момент импульса (параметры M, a)	Вращающаяся черная дыра. Обладает массой и моментом количества движения. Осесимметрична	Решение Керра	1963
Масса, заряд и момент импульса (параметры M, Q, a)	Вращающаяся заряженная черная дыра, самая сложная из всех. Осесимметрична	Решение Керра–Ньюмэна	1965

дения каждого дополнительного параметра (заряда, вращения или их вместе). Решения Райснера–Нордстрёма и Керра сильно отличаются как друг от друга, так и от решения Шварцшильда. Конечно, в пределе, когда заряд и момент количества движения обращаются в нуль ($Q \to 0$ и $a \to 0$), все три более сложных решения сводятся к решению Шварцшильда. И все же черные дыры, обладающие зарядом и/или моментом количества движения, имеют ряд замечательных свойств.

Во время первой мировой войны Г. Райснер и Г. Нордстрём открыли решение эйнштейновских уравнений гравитационного поля, полностью описывающее «заряженную» черную дыру. У такой черной дыры может быть электрический заряд (положительный или отрицательный) и/или магнитный заряд (соответствующий северному или южному магнитному полюсу). Если электрически заряженные тела – дело обычное, то магнитно заряженные – вовсе нет. Тела, у которых есть магнитное поле (например, обычный магнит, стрелка компаса, Земля), обладают обязательно и северным и южными полюсами *сразу*. До самого последнего времени большинство физиков считали, что магнитные полюсы всегда встречаются только парами. Однако в 1975 г. группа ученых из Беркли и Хьюстона объявила, что в ходе одного из экспериментов ими открыт *магнитный монополь*. Если эти результаты подтвердятся, то окажется, что могут существовать и отдельные магнитные заряды, т. е. что северный магнитный полюс может существовать отдельно от южного, и обратно. Решение Райснера – Нордстрёма допускает возможность существования у черной дыры магнитного поля монополя. Независимо от того, как черная дыра приобрела свой заряд, все свойства этого заряда в решении Райснера – Нордстрёма объединяются в одну характеристику – число Q. Эта особенность аналогична тому факту, что решение Шварцшильда не зависит от того, каким образом черная дыра приобрела свою массу. Ее могли составить слоны, камни или звезды – конечный результат будет всегда одним и тем же. При этом геометрия пространства-времени в решении Райснера–Нордстрёма не зависит от природы заряда. Он может быть положительным, отрицательным, соответствовать северному магнитному полюсу или южному – важно лишь его полное значение, которое можно записать как $|Q|$. Итак, свойства черной дыры Райснера – Нордстрёма зависят лишь от двух параметров – полной массы дыры M и ее полного заряда $|Q|$ (иными словами, от его абсолютной величины).

Размышляя о реальных черных дырах, которые могли бы реально существовать в нашей Вселенной, физики пришли к заключению, что решение Райснера – Нордстрёма оказывается *не очень* существенным, ибо электромагнитные силы намного больше сил тяготения. Например, электрическое поле электрона или протона в триллионы триллионов раз сильнее их гравитационного поля. Это значит, что если у черной дыры был бы достаточно большой заряд, то огромные силы электромагнитного происхождения быстро разбросали бы во все стороны газ и атомы, «плавающие» в космосе. В самое короткое время частицы, имеющие такой же знак заряда, как и черная дыра, испытали бы мощное отталкивание, а частицы с противоположным знаком заряда – столь же мощное притяжение к ней. Притягивая частицы с зарядом противоположного знака, черная дыра вскоре стала бы электрически нейтральной. Поэтому можно полагать, что реальные черные дыры обладают зарядом лишь малой величины. Для реальных черных дыр значение $|Q|$ должно быть гораздо меньше, чем M. В самом деле, из расчетов следует, что черные дыры, которые могли бы реально существовать в космосе, должны иметь массу M по крайней мере в миллиард миллиардов раз большую,

чем величина $|Q|$. Математически это выражается неравенством $M \gg |Q|$.

Несмотря на эти, увы, прискорбные ограничения, налагаемые законами физики, весьма поучительно провести подробный анализ решения Райснера–Нордстрёма. Такой анализ подготовит нас к более основательному обсуждению решения Керра в следующей главе.

Чтобы проще подойти к пониманию особенностей решения Райснера–Нордстрёма, рассмотрим обычную черную дыру без заряда. Как следует из решения Шварцшильда, такая дыра состоит из сингулярности, окруженной горизонтом событий. Сингулярность расположена в центре дыры (при $r = 0$), а горизонт событий–на расстоянии 1 шварцшильдовского радиуса (именно при $r = 2M$). Теперь представим себе, что мы придали этой черной дыре небольшой электрический заряд. Как только у дыры появился заряд, мы должны обратиться к решению Райснера–Нордстрёма для геометрии пространства-времени. В решении Райснера–Нордстрёма имеются *два* горизонта событий. Именно, с точки зрения удаленного наблюдателя, существуют два положения на разных расстояниях от сингулярности, где время останавливает свой бег. При самом ничтожном заряде горизонт событий, находившийся ранее на «высоте» 1 шварцшильдовского радиуса, сдвигается немножко ниже к сингулярности. Но еще более удивительно то, что сразу же вблизи сингулярности возникает второй горизонт событий. Таким образом сингулярность в заряженной черной дыре окружена *двумя горизонтами событий–внешним и внутренним*. Структуры незаряженной (шварцшильдовской) черной дыры и заряженной черной дыры Райснера–Нордстрёма (при $M \gg |Q|$) сопоставлены на рис. 10.2.

Если мы будем увеличивать заряд черной дыры, то внешний горизонт событий станет сжиматься, а внутренний–расширяться. Наконец, когда заряд черной дыры достигнет значения, при котором выполняется равенство $M = |Q|$, оба горизонта сливаются друг с другом. Если увеличить заряд еще больше, то горизонт событий полностью исчезнет, и остается *«голая» сингулярность*. При $M < |Q|$ горизонты событий *отсутствуют*, так что сингулярность открывается прямо во внешнюю Вселенную. Такая картина нарушает знаменитое «правило космической этики», предложенное Роджером Пенроузом. Это правило («нельзя обнажать сингулярность!») будет подробнее обсуждаться ниже. Последовательность схем на рис. 10.3 иллюстрирует расположение горизонтов событий у черных дыр, имеющих одну и ту же массу, но разные значения заряда.

Рис. 10.3 иллюстрирует положение горизонтов событий относительно сингулярности черных дыр *в пространстве*, но еще полезнее проанализировать диаграммы пространства-времени для

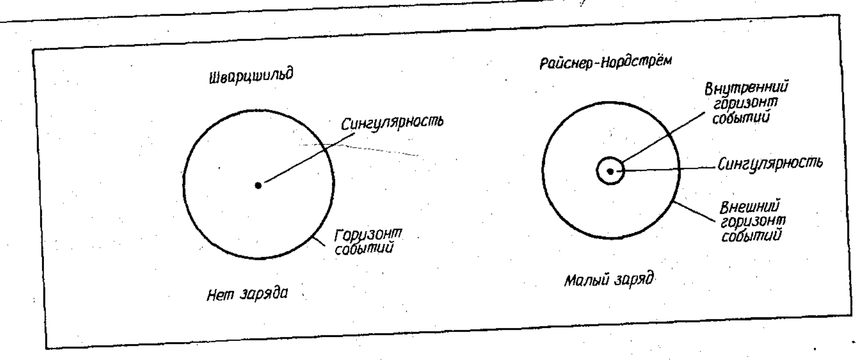


РИС. 10.2.
Заряженные и нейтральные черные дыры. Добавление хотя бы ничтожного по величине заряда приводит к появлению второго (внутреннего) горизонта событий прямо над сингулярностью.

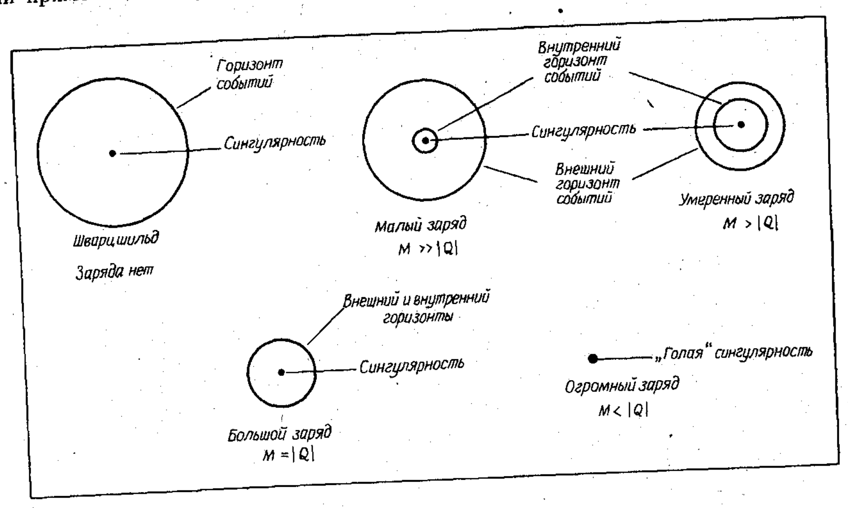


РИС. 10.3.
Изображение заряженных черных дыр в пространстве. По мере добавления заряда в черную дыру внешний горизонт событий постепенно сжимается, а внутренний–расширяется. Когда полный заряд дыры достигает значения $|Q| = M$, оба горизонта сливаются в один. При еще бóльших значениях заряда горизонт событий вообще исчезает и остается открытая, или «голая», сингулярность.

заряженных черных дыр. Чтобы построить такие диаграммы — графики зависимости времени от расстояния, мы начнем с «прямолинейного» подхода, использованного в начале предыдущей главы (см. рис. 9.3). Измеряемое наружу от сингулярности расстояние откладывается по горизонтали, а время, как обычно,–по вертикали. На такой диаграмме левая часть графика всегда ограничивается сингулярностью, описываемой линией, идущей верти-

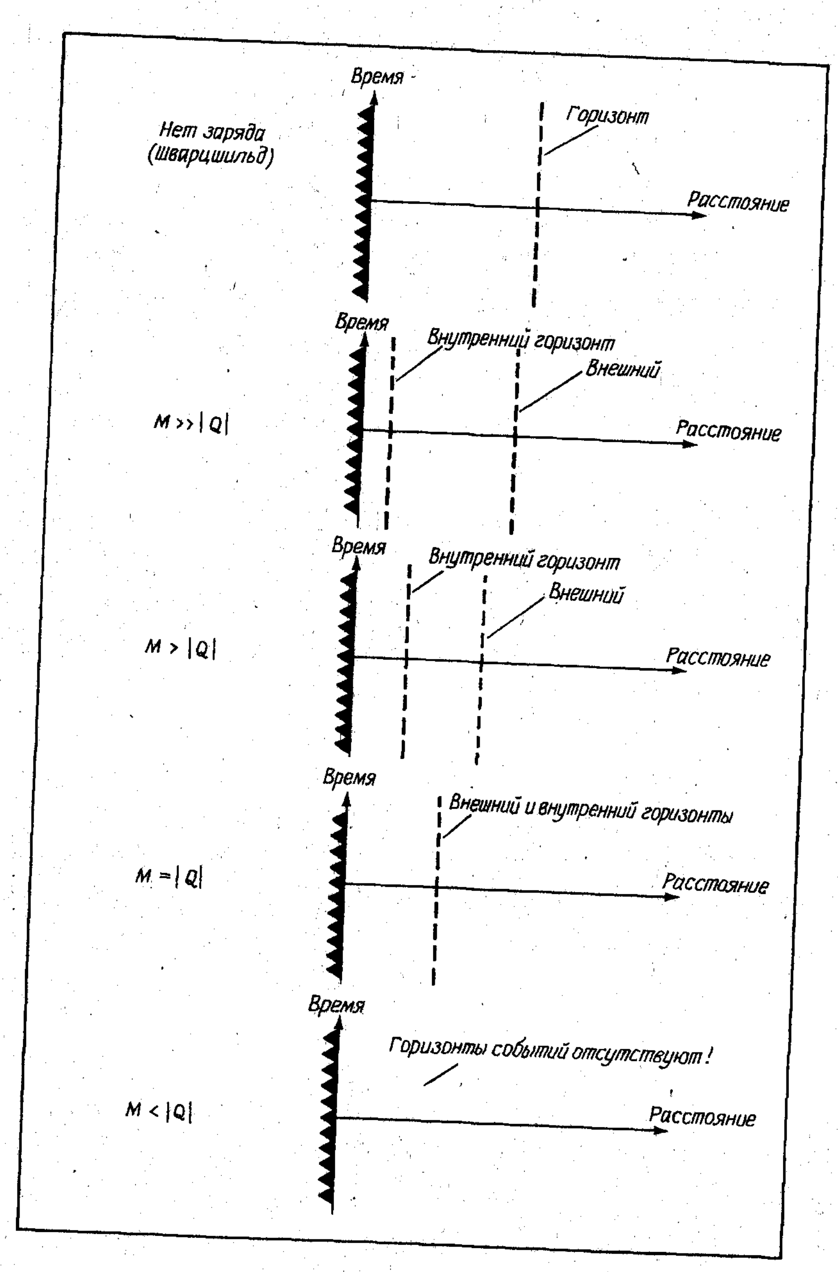


РИС. 10.4.
Диаграммы пространства-времени для заряженных черных дыр. Эта последовательность диаграмм иллюстрирует вид пространства-времени для черных дыр, имеющих одинаковую массу, но разные заряды. Вверху для сравнения приведена диаграмма для шварцшильдовской черной дыры ($|Q| = 0$).

кально от удаленного прошлого к далекому будущему. Мировые линии горизонтов событий также представляют собой вертикали и отделяют внешнюю Вселенную от внутренних областей черной дыры.

На рис. 10.4 показаны диаграммы пространства-времени для нескольких черных дыр, имеющих одинаковые массы, но разные заряды. Вверху для сравнения приведена диаграмма для шварцшильдовской черной дыры (вспомним, что решение Шварцшильда – это то же, что решение Райснера–Нордстрёма при $|Q| = 0$). Если этой дыре добавить совсем небольшой заряд, то второй (внутренний) горизонт будет расположен непосредственно вблизи сингулярности. Для черной дыры с зарядом умеренной величины ($M > |Q|$) внутренний горизонт расположен дальше от сингулярности, а внешний уменьшил свою высоту над сингулярностью. При очень большом заряде ($M = |Q|$; в этом случае говорят о *предельном решении Райснера–Нордстрёма*) оба горизонта событий сливаются воедино. Наконец, когда заряд исключительно велик ($M < |Q|$), горизонты событий просто исчезают. Как видно из рис. 10.5, при отсутствии горизонтов сингулярность открывается прямо во внешнюю Вселенную. Удаленный наблюдатель может видеть эту сингулярность, а космонавт может влететь прямо в область сколь угодно сильно искривленного пространства-времени, не пересекая никаких горизонтов событий. Подробный расчет показывает, что непосредственно рядом с сингулярностью тяготение начинает действо-

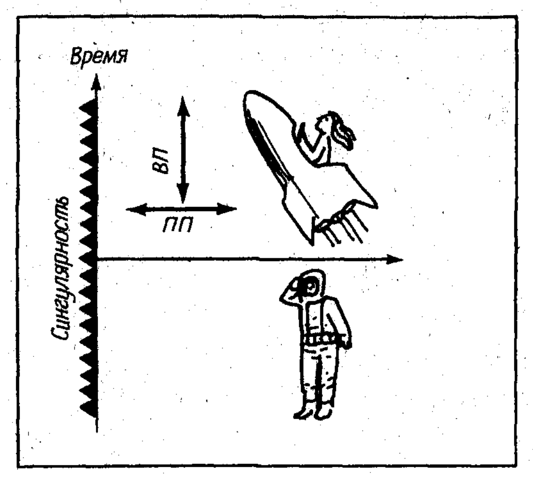


РИС. 10.5.
«Голая» сингулярность. Черную дыру, заряд которой чудовищно ($M < |Q|$), вообще не окружает горизонт событий. Вопреки «закону космической этики» сингулярность красуется на виду у всей внешней Вселенной.

вать как отталкивание. Хотя черная дыра и притягивает к себе космонавта, пока тот находится достаточно далеко от нее, но стоит ему приблизиться к сингулярности на очень малое расстояние, и он подвергнется отталкиванию. Полной противоположностью случая решения Шварцшильда является область пространства непосредственно около сингулярности Райснера – Нордстрёма – это царство антигравитации.

Неожиданности решения Райснера – Нордстрёма не исчерпываются двумя горизонтами событий и гравитационным отталкиванием вблизи сингулярности. Вспоминая сделанный выше подробный анализ решения Шварцшильда, можно думать, что диаграммы типа изображенных на рис. 10.4 описывают далеко *не все* стороны картины. Так, в геометрии Шварцшильда мы столкнулись с большими трудностями, вызванными наложением друг на друга в упрощенной диаграмме *разных* областей пространства-времени (см. рис. 9.9). Такие же трудности ждут нас и в диаграммах типа рис. 10.4, так что пора перейти к их выявлению и преодолению.

Легче понять *глобальную структуру* пространства-времени, применяя следующие элементарные правила. Выше мы разобрались, в чем состоит глобальная структура шварцшильдовской черной дыры. Соответствующая картина, именуемая *диаграммой Пенроуза*, изображена на рис. 9.18. Она может быть названа и диаграммой Пенроуза для частного случая черной дыры Райснера – Нордстрёма, когда заряд отсутствует ($|Q| = 0$). Более того, если мы лишим дыру Райснера – Нордстрёма заряда (т.е. перейдем к пределу $|Q| \to 0$), то наша диаграмма (какой бы она ни была) обязательно сведется в пределе к диаграмме Пенроуза для решения Шварцшильда. Отсюда следует наше первое правило: должна существовать другая Вселенная, противоположная нашей, достижение которой возможно лишь по запрещенным пространственноподобным линиям.

При построении диаграммы Пенроуза для заряженной черной дыры появляются основания ожидать существования множества Вселенных. У каждой из них должно быть пять типов бесконечностей (I^-, $\mathscr{I}^-$, I^0, $\mathscr{I}^+$ и I^+), рассмотренных в предыдущей главе. Кроме того, каждая из этих внешних Вселенных должна изображаться в виде треугольника, так как метод конформного отображения Пенроуза работает в данном случае как бригада маленьких бульдозеров (см. рис. 9.14 или 9.17), «сгребающих» все пространство-время в один компактный треугольник. Поэтому нашим вторым правилом будет следующее: любая внешняя Вселенная должна представляться в виде треугольника, обладающего пятью типами бесконечностей. Такая внешняя Вселенная может быть ориентирована либо направо (как на рис. 10.6), либо налево.

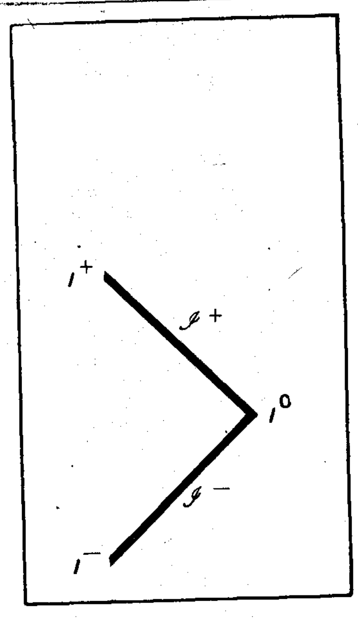


РИС. 10.6.
Внешняя Вселенная. На диаграмме Пенроуза для любой черной дыры внешняя Вселенная всегда изображается треугольником с пятью бесконечностями (I^-, $\mathscr{I}^-$, I^0, $\mathscr{I}^+$, I^+). Такая внешняя Вселенная может быть ориентирована углом направо (как изображено на рисунке) или налево.

Чтобы прийти к третьему правилу, напомним, что на диаграмме Пенроуза (см. рис. 9.18) горизонт событий шварцшильдовской черной дыры имел наклон 45°. Итак, третье правило: любой горизонт событий должен быть светоподобен, и поэтому всегда имеет наклон 45°.

Для вывода четвертого (и последнего) правила вспомним, что при переходе через горизонт событий пространство и время менялись ролями в случае шварцшильдовской черной дыры. Из подробного анализа пространственноподобных и временноподобных направлений для заряженной черной дыры следует, что и здесь получится та же картина. Отсюда четвертое правило: пространство и время меняются ролями *всякий раз*, когда пересекается горизонт событий.

На рис. 10.7 только что сформулированное четвертое правило проиллюстрировано для случая черной дыры с малым или умеренным зарядом ($M > |Q|$). Вдали от такой заряженной черной дыры пространственноподобное направление параллельно пространственной оси, а временноподобное – параллельно временной оси. Пройдя под внешний горизонт событий, мы обнаружим смену ролей этих двух направлений – пространственноподобное направление теперь стало параллельно оси времени, а временноподобное – параллельно пространственной оси. Однако, продолжая движение к центру и опустившись под внутренний горизонт событий, мы становимся свидетелями второй смены ролей. Вблизи сингулярности ориентация пространственноподобного и времен-

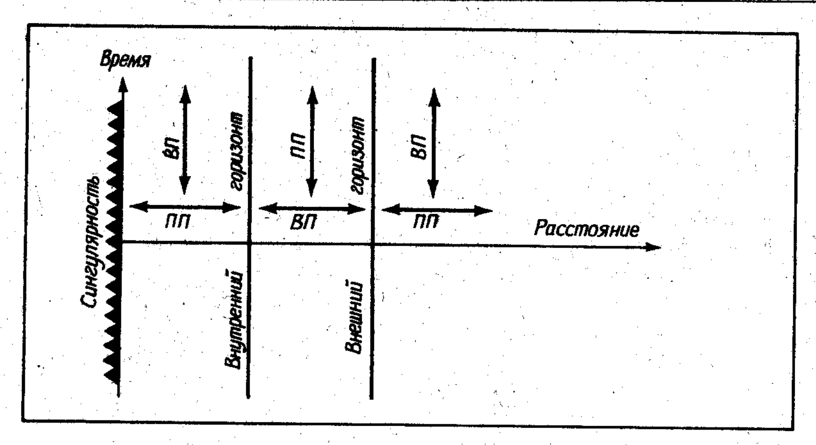


РИС. 10.7.
Смена ролей пространства и времени (для $M > |Q|$). Всякий раз при пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями. Это значит, что в заряженной черной дыре из-за наличия двух горизонтов событий полная смена ролей у пространства и времени происходит дважды.

ноподобного направлений становится такой же, какой она была вдали от черной дыры.

Двукратная смена ролей пространственноподобного и времениподобного направлений имеет решающее значение для природы сингулярности заряженной черной дыры. В случае шварцшильдовской черной дыры, у которой нет заряда, пространство и время меняются ролями *всего один раз*. Внутри единственного горизонта событий линии постоянного расстояния направлены в пространственноподобном (горизонтальном) направлении. Значит, линия, изображающая расположение сингулярности ($r = 0$), должна быть горизонтальной, т.е. направлена пространственноподобно. Однако, когда имеются *два* горизонта событий, линии постоянного расстояния вблизи сингулярности имеют времениподобное (вертикальное) направление. Поэтому линия, описывающая положение сингулярности заряженной дыры ($r = 0$), должна быть вертикальной, и ее следует ориентировать времениподобно. Поэтому так мы приходим к заключению первостепенной важности: сингулярность заряженной черной дыры должна быть времениподобной!

Теперь можно, воспользовавшись приведенными выше правилами, построить диаграмму Пенроуза для решения Райснера–Нордстрёма. Начнем с того, что представим себе космонавта, находящегося в нашей Вселенной (скажем, просто на Земле). Он садится в свой космический корабль, включает двигатели и направляется к заряженной черной дыре. Как видно из рис. 10.8, наша Вселенная имеет на диаграмме Пенроуза вид треугольника

с пятью бесконечностями. Любой допустимый путь космонавта должен быть ориентирован на диаграмме всегда под углом менее 45° к вертикали, так как лететь со сверхсветовой скоростью он не может. На рис. 10.8 такие допустимые мировые линии изображены пунктиром. С приближением космонавта к заряженной черной дыре он опускается под внешний горизонт событий (который должен иметь наклон точно 45°). Пройдя этот горизонт, космонавт уже никогда не сможет вернуться в *нашу* Вселенную. Однако он может опуститься дальше под внутренний горизонт событий, также имеющий наклон 45°. Под этим внутренним горизонтом космонавт может по глупости столкнуться с сингулярностью, где ему придется подвергнуться действию гравитационного отталкивания и где пространство-время искривлено бесконечно сильно. Заметим, однако, что трагический исход полета отнюдь *не неизбежен*! Так как сингулярность заряженной черной дыры времениподобна, она должна на диаграмме Пенроуза изображаться вертикальной линией. Космонавт может избежать гибели, попросту направив свой космический корабль от сингулярности по разрешенному времениподобному пути, как это изображено на рис. 10.8. Спасительная траектория уводит его от сингулярности, и он снова пересекает внутренний горизонт событий, также имеющий наклон 45°. Продолжая полет, космонавт выходит за внешний горизонт событий (и он имеет наклон 45°) и попадает во внешнюю Вселенную. Поскольку подобное путешествие, очевидно, требует времени, то последовательность событий вдоль мировой линии должна идти от прошлого к будущему. Поэтому космонавт *не может* вернуться снова в нашу

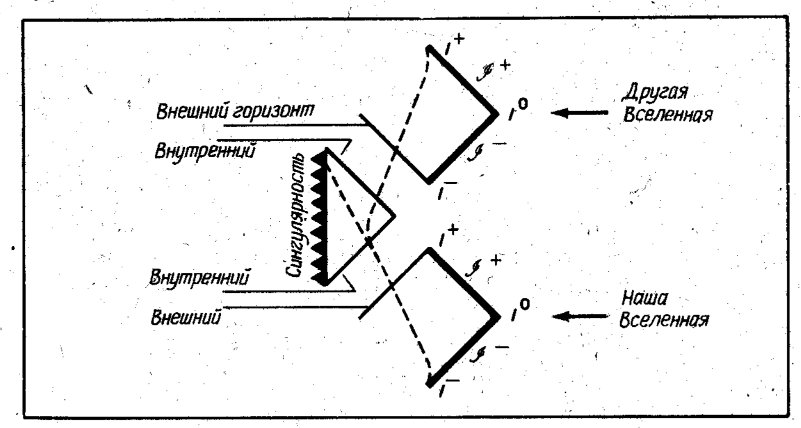


РИС. 10.8.
Участок диаграммы Пенроуза. Часть диаграммы Пенроуза для решения Райснера–Нордстрёма можно построить, рассматривая возможные мировые линии космонавта, направляющегося из нашей Вселенной в заряженную черную дыру.

Вселенную, а попадет в другую Вселенную, Вселенную будущего. Как и следовало ожидать, эта Вселенная будущего должна иметь вид треугольника с обычными пятью бесконечностями на диаграмме Пенроуза.

Следует подчеркнуть, что при построении этих диаграмм Пенроуза мы снова встречаемся как с черными, так и с белыми дырами. Космонавт может выскочить наружу сквозь горизонты событий и оказаться во внешней Вселенной будущего. Большинство физиков убеждены, что белых дыр в природе в принципе быть не может. Но мы все же продолжим теоретический разбор глобальной структуры пространства-времени, включающей существование бок о бок друг с другом черных и белых дыр. Доводы же, свидетельствующие против существования белых дыр, мы отложим до гл. 14.

Изложенные эпизоды полета и диаграммы на рис. 10.8 должны быть не более чем фрагментом некоего целого. Диаграмму Пенроуза для заряженной черной дыры необходимо дополнить по крайней мере одним экземпляром другой Вселенной, противоположной нашей, которая достижима лишь по (запрещенным) пространственноподобным мировым линиям. Такой вывод основывается на нашем *правиле 1*: если удалить из черной дыры ее заряд, то диаграмма Пенроуза должна свестись к изображению решения Шварцшильда. И хотя никто из нашей Вселенной никогда не сможет проникнуть в эту «другую» Вселенную ввиду невозможности двигаться быстрее света, мы все же можем себе представить космонавта из той, другой Вселенной, путешествующего к той же самой заряженной черной дыре. Его возможные мировые линии изображены на рис. 10.9.

Такое путешествие чужого космонавта из другой Вселенной выглядит совершенно так же, как путешествие космонавта, вылетевшего из нашей Вселенной, с Земли. Чужая Вселенная также изображается на диаграмме Пенроуза привычным треугольником. По пути к заряженной черной дыре чужой космонавт пересекает внешний горизонт событий, который должен иметь наклон 45°. Позднее он опускается и под внутренний горизонт событий, также с наклоном 45°. Чужак стоит теперь перед выбором: либо разбиться о временноподобную сингулярность (она вертикальна на диаграмме Пенроуза), либо свернуть и снова пересечь внутренний горизонт событий. Чтобы избежать прискорбного конца, чужак решает покинуть черную дыру и выходит через внутренний горизонт событий, который, как обычно, имеет наклон 45°. Затем он пролетает и через внешний горизонт событий (наклоненный на диаграмме Пенроуза на 45°) в новую Вселенную будущего.

Каждое из этих двух гипотетических путешествий охватывает только две части полной диаграммы Пенроуза. Полная же картина получается, если просто объединить эти части друг с другом, как показано на рис. 10.10. Такая диаграмма должна быть повторена бесконечное число раз в будущее и в прошлое, поскольку каждый из рассмотренных двух космонавтов мог бы решить снова покинуть ту Вселенную, в которой он вынырнул, и опять отправиться в заряженную черную дыру. Таким образом космонавты могут проникнуть в другие Вселенные, еще более удаленные в будущее. Точно так же мы можем представить себе, как другие космонавты из Вселенных в отдаленном прошлом прибывают в нашу Вселенную. Поэтому полная диаграмма Пенроуза повторяется в обе стороны во времени, подобно длинной ленте с повторяющимся трафаретным рисунком. В целом глобальная геометрия заряженной черной дыры объединяет бесконечное число Вселенных в прошлом и в будущем с нашей собственной Вселенной. Это так же удивительно, как и то, что, используя заряженную черную дыру, космонавт может осуществлять перелеты из одних Вселенных в другие. Такая невероятная картина тесно связана с представлением о *белой дыре*, которое будет обсуждаться в одной из следующих глав.

Только что описанный подход к выяснению глобальной структуры пространства-времени касался случая черных дыр с малым или небольшим зарядом ($M > |Q|$). Однако в случае предельной черной дыры Райснера–Нордстрёма (когда $M = |Q|$) заряд оказывается настолько большим, что внутренний и внешний горизонты сливаются друг с другом. Такое объединение двух горизонтов событий приводит к ряду интересных последствий.

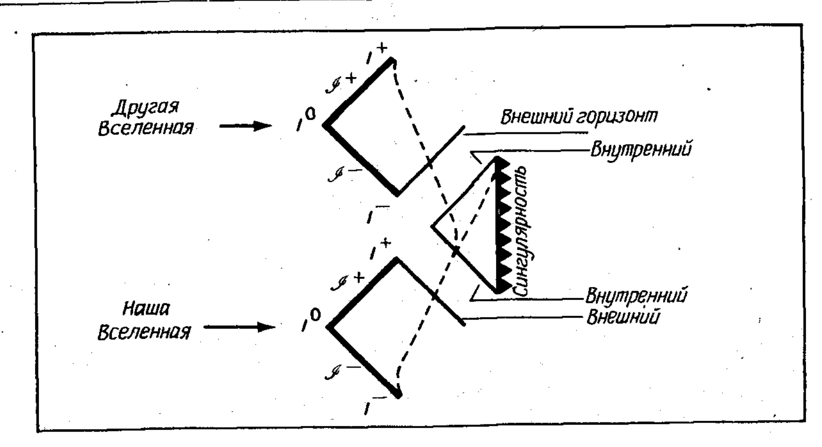


РИС. 10.9.
Другой участок диаграммы Пенроуза. Этот новый участок диаграммы Пенроуза для решения Райснера–Нордстрёма можно построить, рассматривая возможные мировые линии космонавта из чужой Вселенной.

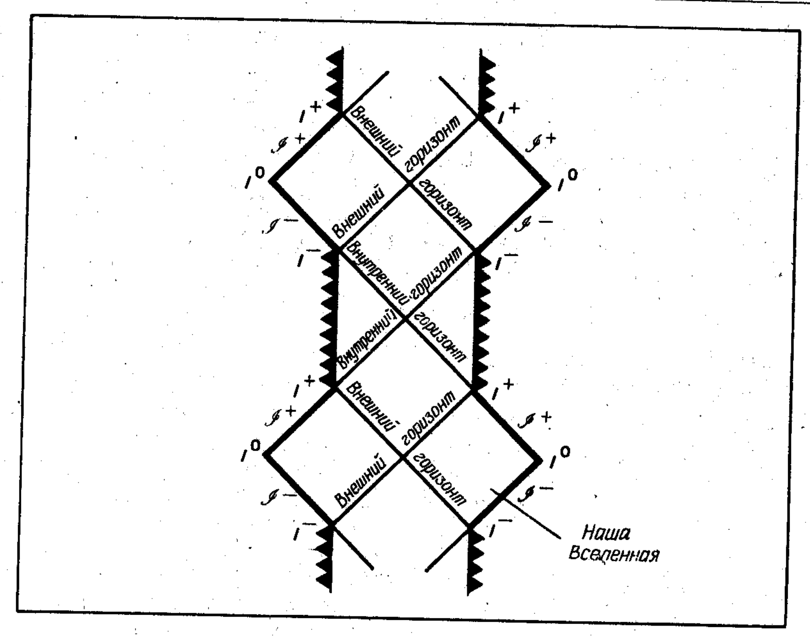


РИС. 10.10.

Полная диаграмма Пенроуза для черной дыры Райснера–Нордстрёма ($M > |Q|$). Полную диаграмму Пенроуза для черной дыры, имеющей малый или умеренный заряд ($M > |Q|$), можно построить, соединяя участки, изображенные на рис. 10.8 и 10.9. Эта диаграмма повторяется до бесконечности как в будущее, так и в прошлое.

Вспомним, что вдали от заряженной черной дыры (вне внешнего горизонта событий) пространственноподобное направление параллельно пространственной оси, а временноподобное параллельно оси времени. Вспомним также, что вблизи сингулярности (под внутренним горизонтом событий – после того, как пространство и время дважды поменяются ролями) пространственноподобное направление снова параллельно пространственной оси, а временноподобное – оси времени. По мере того как заряд черной дыры Райснера – Нордстрёма все больше и больше увеличивается, область *между* двумя горизонтами событий все уменьшается и уменьшается. Когда же, наконец, заряд возрастает настолько, что $M = |Q|$, эта промежуточная область сожмется до нуля. Следовательно, при переходе через объединенный внешне-внутренний горизонт событий пространство и время не меняются ролями. Конечно, можно с тем же успехом говорить и о двукратной смене ролей у пространства и времени, происходящей одновременно на единственном горизонте событий предельной черной дыры Райснера – Нордстрёма. Как показано на

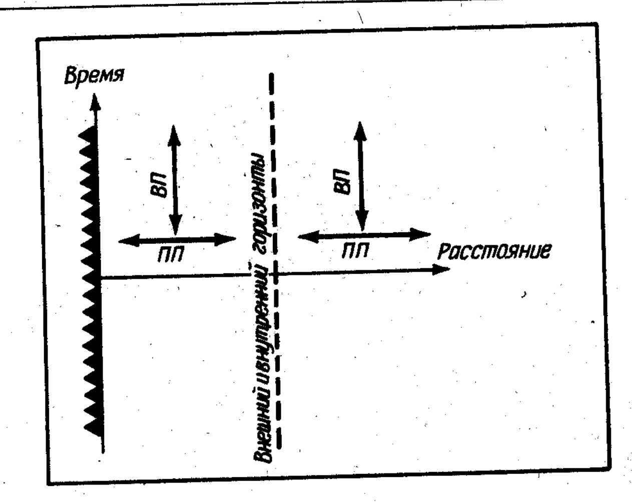


РИС. 10.11.

Диаграмма пространства-времени для предельной черной дыры Райснера–Нордстрёма ($M = |Q|$). Когда заряд черной дыры становится столь велик, что $M = |Q|$, внутренний и внешний горизонты событий сливаются. Это значит, что при переходе через получившийся (двойной) горизонт смены ролей у пространства и времени не происходит.

рис. 10.11, временноподобное направление в ней повсюду параллельно оси времени, а пространственноподобное – везде параллельно пространственной оси.

Хотя у предельной черной дыры Райснера – Нордстрёма имеется только один горизонт событий, положение здесь *совсем иное*, чем в случае шварцшильдовской черной дыры, у которой горизонт событий тоже всего один. При одиночном горизонте событий всегда имеет место смена ролей пространственно- и временноподобных направлений, как это видно на рис. 10.12. Однако у предельной черной дыры Райснера – Нордстрёма горизонт событий можно трактовать как «двойной», т. е. как наложенные друг на друга внутренний и внешний горизонты. Именно поэтому смены ролей пространства и времени не происходит.

Факт слияния внешнего и внутреннего горизонтов событий у предельной черной дыры Райснера – Нордстрёма означает, что требуется *новая* диаграмма Пенроуза. Как и прежде, ее можно построить, рассматривая мировую линию гипотетического космонавта. При этом список правил остается прежним, за тем существенным исключением, что при пересечении горизонта событий пространство и время *не меняются* ролями.

Представим себе космонавта, вылетающего с Земли и падающего в предельную черную дыру Райснера – Нордстрёма. Наша Вселенная, как обычно, изображается в виде треугольника на диаграмме Пенроуза. После погружения под горизонт событий

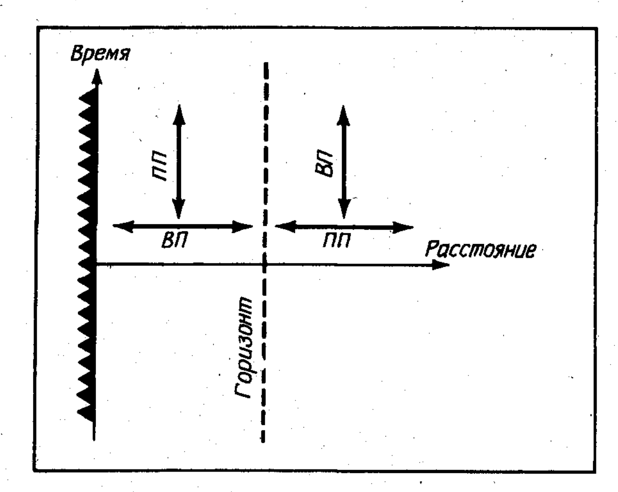


РИС. 10.12.
Диаграмма пространства-времени для шварцшильдовской черной дыры ($|Q| = 0$). Хотя у шварцшильдовской черной дыры (не имеющей заряда) есть лишь один горизонт событий, при переходе с одной его стороны на другую пространство и время меняются ролями. (Ср. с рис. 10.11.)

космонавт волен сделать выбор: он может либо врезаться в сингулярность, которая временноподобна, а потому должна изображаться вертикально на диаграмме Пенроуза, либо (рис. 10.13) увести свой космический корабль от сингулярности по разрешенной временноподобной мировой линии. Если он выбрал второй путь, то позднее он снова пересечет горизонт событий, выходя в другую Вселенную. Перед ним снова встанет альтернатива – остаться в этой будущей Вселенной и слетать на какие-нибудь планеты или повернуть назад и снова отправиться в черную дыру. Если космонавт повернет обратно, он продолжит свой путь вверх по диаграмме Пенроуза, посещая любое число Вселенных будущего. Полная картина представлена на рис. 10.13. Как и прежде, диаграмма повторяется бесконечное число раз в прошлое и в будущее, подобно ленте с повторяющимся трафаретным рисунком.

С точки зрения математики допустима и черная дыра с огромным зарядом $M < |Q|$; правда, она не имеет смысла с точки зрения физики. В этом случае горизонты событий попросту исчезают, остается лишь «голая» сингулярность. Ввиду отсутствия горизонтов событий не может быть и речи о каком-то обмене ролями между пространством и временем. Сингулярность просто находится у всех на виду. *«Голая» сингулярность* – это не закрытая никакими горизонтами область бесконечно сильно искривленного пространства-времени.

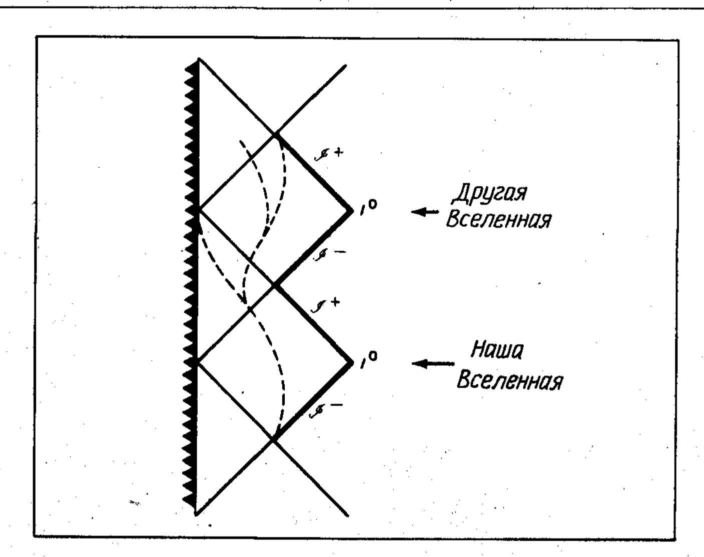


РИС. 10.13.
Диаграмма Пенроуза для предельной черной дыры Райснера–Нордстрёма ($M = |Q|$). Диаграмму глобальной структуры пространства-времени можно построить, если рассмотреть возможные мировые линии космонавта, ныряющего в предельную черную дыру Райснера–Нордстрёма и выныривающего из нее.

Если космонавт, вылетев с Земли, устремляется к «голой» сингулярности, ему не приходится опускаться под горизонт событий. Он остается все время в нашей Вселенной. Вблизи сингулярности на него действуют мощные отталкивающие гравитационные силы. Располагая достаточно мощными двигателями, космонавт при некоторых условиях смог бы врезаться в сингулярность, хотя это – чистейшее безумие с его стороны. Простое падение на сингулярность – ни с какой другой Вселенной «голая» сингулярность нашу Вселенную не связывает. Как и в случае любых других заряженных черных дыр, здесь сингулярность также временноподобна и поэтому должна изображаться на диаграмме Пенроуза вертикалью. Поскольку, кроме нашей Вселенной, других Вселенных теперь нет, то диаграмма Пенроуза для «голой» сингулярности выглядит совсем просто. Из рис. 10.14 видно, что наша Вселенная, как обычно, изображается треугольником с пятью бесконечностями, ограниченным слева сингулярностью. Что бы ни находилось левее сингулярности, отрезано от нас полностью. Через сингулярность никто и ничто не могут пройти.

Поскольку у реальных черных дыр могут быть лишь очень слабые заряды (если они есть у них вообще), то значительная часть описанного выше представляет лишь академический интерес. Однако мы в результате установили безотказно действую-

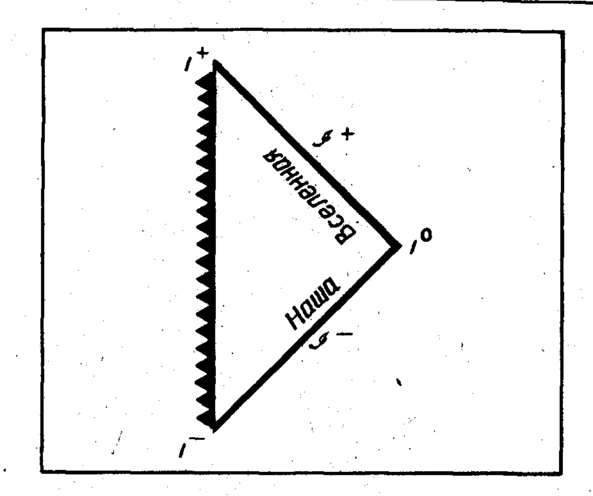


РИС. 10.14.
«Голая» сингулярность. У «голой» сингулярности ($M < |Q|$) горизонтов событий нет. Черная дыра этого типа *не связывает* нашу Вселенную с какой-либо другой Вселенной.

щие правила построения сложных диаграмм Пенроуза. Хотя заряженные черные дыры, видимо, не играют роли в астрофизике, вращающиеся черные дыры для нее очень важны. Астрофизики даже предполагают, что реальные черные дыры могут вращаться с гигантскими скоростями, а те методы, которые были развиты выше, окажутся весьма полезными для анализа керровских черных дыр.

11

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Мысль о том, что в космосе действительно должны существовать черные дыры, родилась тогда, когда астрономы начали лучше понимать законы эволюции звезд. В частности, в 1960-х годах было показано, что если масса умирающей звезды превышает три солнечных, ее сжатию не могут воспрепятствовать никакие известные физические силы. Отсюда последовал вывод, что такая звезда должна катастрофически сжаться – сколлапсировать – до объема, равного нулю, что приводит к появлению в пространстве-времени сингулярности, окруженной по меньшей мере одним горизонтом событий. К 1970 г. астрофизики доказали, что помимо массы черные дыры могут характеризоваться не более чем двумя дополнительными параметрами. У них могут быть заряд или момент количества движения или и то, и другое вместе. Черные дыры, обладающие лишь массой, описываются решением Шварцшильда и рассматривались в гл. 8 и 9. Черные дыры с массой и зарядом (электрическим или магнитным) описываются решением Райснера–Нордстрёма и рассматривались в предыдущей главе. Однако, анализируя поведение заряженных черных дыр, астрофизики нашли веские доводы, свидетельствующие против того, что реальные черные дыры могут иметь значительный заряд. Если бы черная дыра образовалась, имея большой заряд, то она скоро стала бы нейтральной, вызвав диссоциацию окружающего ее в космосе газа. Реальные черные дыры либо имеют весьма малый заряд, либо вообще лишены его.

Означает ли сказанное, что реальные черные дыры, которые могут встретиться в космосе, только шварцшильдовские? Отнюдь нет! Астрономы убеждены, что практически все звезды вращаются. Один оборот Солнца вокруг его оси занимает примерно 4 недели. К тому же астрономы обнаружили, что более массивные, чем Солнце, звезды вращаются быстрее. А такие массивные звезды – это одновременно и перспективные кандидаты в будущие черные дыры. Вспомним также наше обсуждение свойств пульсаров (гл. 7), где было выяснено, что при уменьшении размеров умирающей звезды скорость ее вращения обязательно увеличивается. Это – прямое следствие закона *сохранения момента ко-*

личества движения. Коллапсирующая звезда вращается быстрее по той же самой причине, по которой фигурист, делающий пируэт, начинает вращаться быстрее, если прижмет к себе руки (см. рис. 7.6). Поскольку умирающие звезды начинают вращаться все быстрее, когда в ходе коллапса они становятся все меньше, то вполне резонно предположить, что и реальные черные дыры должны вращаться. У них должен быть момент количества движения.

Мысль о том, что достаточно реалистические модели черных дыр должны обладать вращением, не нова. Однако целых пятьдесят лет после создания общей теории относительности во всех расчетах использовалось только решение Шварцшильда. Все понимали, что нужно учитывать влияние вращения, но никто не мог правильно решить уравнения Эйнштейна. Собственно говоря, полное решение уравнений гравитационного поля с учетом вращения должно зависеть от двух параметров – массы черной дыры (обозначаемой буквой M) и момента количества движения дыры (обозначаемого буквой a). Кроме того, это решение должно быть *асимптотически плоским*, т.е. вдали от черной дыры пространство-время должно становиться плоским. Но уравнения гравитационного поля настолько сложны математически, что никому не удавалось отыскать ни одного точного решения, удовлетворяющего этим простым требованиям.

Решительный шаг вперед в этом направлении был сделан в 1963 г., когда Рой П. Керр, австралийский математик, работавший тогда в Техасском университете (США), нашел полное решение уравнений гравитационного поля для вращающейся черной дыры. Впервые почти за полсотни лет после основополагающей работы Эйнштейна астрофизики получили, наконец, математическое описание геометрии пространства-времени, окружающего массивный вращающийся объект. К 1975 г. была доказана *единственность* решения Керра. Точно так же, как все возможные решения для черных дыр, обладающих лишь массой (M), эквивалентны решению Шварцшильда, а все возможные решения для черных дыр с массой и зарядом (M и Q) эквивалентны решению Райснера – Нордстрёма, все возможные решения с массой и моментом количества движения (M и a) должны быть эквивалентны решению Керра. Получение решения Керра является одним из важнейших достижений теоретической астрофизики середины XX в.

До опубликования работы Керра был известен только один существенный эффект, связанный с вращением масс в общей теории относительности, – эффект увлечения инерциальных систем. Его иногда называют эффектом Лензе – Тирринга, и он кратко упоминался в предыдущей главе. Увлечение инерциальных систем – это такое явление, когда окружающее пространство-время

вовлекается во вращение вместе с вращающимся телом. Можно привести общие доводы, которые показывают, что такое явление должно иметь место вблизи любого вращающегося тела. Однако до получения Керром в 1963 г. его решения у астрофизиков не было возможности математически показать, насколько важным должен быть этот эффект в случае вращающихся черных дыр. К концу 1960-х годов подробный анализ увлечения инерциальных систем черными дырами привел к ряду замечательных открытий.

Вероятно, для понимания эффекта увлечения инерциальных систем черными дырами лучше всего использовать простой опыт с лампами-вспышками. Лампа-вспышка (типа используемой в фотографии) дает мгновенный импульс света. В обычном плоском пространстве-времени такой мгновенный импульс света распространяется одинаково во всех направлениях от лампы со скоростью 300 000 км/с. В любой момент после вспышки существует распространяющийся наружу сферический слой света с центром в точности там, где находится лампа (см. рис. 11.1). Этот расширяющийся слой света можно схематически изобразить в виде окружности, в центре которой находится лампа-вспышка.

Чтобы разобраться в свойствах черных дыр, представим себе, что на разных расстояниях от дыры расположено множество ламп-вспышек. Возьмем сначала статическую (шварцшильдовскую) черную дыру, изображенную на рис. 11.2. Пусть лампы-вспышки, находящиеся на разных расстояниях от черной дыры, испустят свои световые импульсы; посмотрим, где будут находиться получившиеся расширяющиеся слои света. Вдали от черной дыры, где пространство-время практически плоское, центром такого расширяющегося слоя всегда оказывается место, в котором находилась лампа-вспышка в момент испускания импульса. Однако, переходя к лампам, расположенным все ближе и ближе к черной дыре, мы заметим, что расширяющийся сферический слой оказывается все более сдвинутым в сторону дыры. Если же лампа вспыхнула на самом горизонте событий, то расширяю-

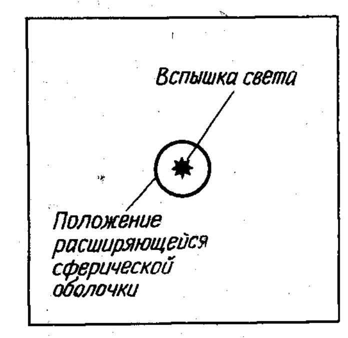


РИС. 11.1.
Лампа-вспышка в плоском пространстве-времени. Звездочкой обозначено положение лампы-вспышки в момент испускания светового импульса, окружность – положение расширяющегося наружу сферического слоя света через 1 микросекунду после вспышки. В плоском пространстве-времени центр слоя света – это местоположение лампы в момент вспышки.

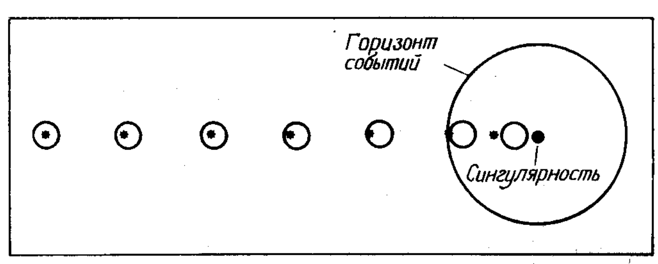


РИС. 11.2.

Вспышки света вблизи шварцшильдовской черной дыры. Расширяющиеся сферические слои света от лампы-вспышки, которую включают около невращающейся черной дыры, затягиваются в дыру. При этом сферические слои света, испущенного лампой на горизонте событий или внутри его, распространяются только внутрь по отношению к месту, в котором произошла вспышка. Горизонт событий здесь одновременно играет роль *предела статичности.*

щийся слой света будет находиться полностью с внутренней стороны горизонта. Так должно быть, потому что ничто – даже свет – не может выйти через горизонт наружу. Внутри же горизонта событий свет так сильно притягивается к сингулярности, что место, где находилась лампа-вспышка, лежит вообще вне расширяющегося сферического слоя; это видно из рис. 11.2.

Этот эксперимент свидетельствует, что внутри горизонта событий шварцшильдовской черной дыры сохранять состояние покоя *невозможно.* Так как двигаться быстрее света нельзя, то все, что попало внутрь горизонта событий, втягивается в сингулярность. Помимо того, если вы, находясь на горизонте событий, хотите остаться на нем в состоянии покоя, то для этого вам потребуется направленная наружу скорость, равная скорости света. Вообразим снова космонавта, летящего на космическом корабле. По мере приближения к черной дыре он должен включать двигатели корабля на все бóльшую и бóльшую мощность, чтобы не упасть в дыру. Чем ближе корабль подходит к дыре, тем бóльшую мощность должны развивать его двигатели, чтобы удержать корабль на постоянной высоте над дырой. Разумеется, на горизонте событий потребовалась бы такая мощность двигателей, чтобы скорость корабля в направлении от черной дыры стала равна скорости света. В противном случае космический корабль «засосало» бы внутрь дыры; оказавшись под горизонтом событий, корабль был бы обречен на неизбежное падение на сингулярность, сколь бы мощными ни были бы его двигатели. Поэтому горизонт событий шварцшильдовской черной дыры является наименьшим расстоянием от дыры, на котором космонавт еще мог бы находиться в состоянии покоя. Следовательно, в шварцшильдовской черной дыре горизонт событий – это одновременно и *предел статичности.* На пределе статичности необходимо двигаться со скоростью света, чтобы оставаться на одном и том же месте.

Теперь повторим опыт с лампами-вспышками вблизи вращающейся черной дыры. Вдали от дыры, где пространство-время практически плоское, расширяющиеся сферические слои света по-прежнему имеют своим центром место, где находилась лампа-вспышка в момент испускания светового импульса. Однако по мере приближения к черной дыре становятся заметными сразу *два* эффекта. Как и прежде, гравитационное поле черной дыры затягивает свет внутрь. Но так как дыра вращается, пространство-время вокруг нее вовлекается в это вращение. Поэтому расширяющийся слой света тоже вовлекается в это движение в том же направлении, в котором вращается дыра. Как видно из рис. 11.3, совместное действие этих двух эффектов приводит к тому, что расширяющийся сферический слой света вовлекается одновременно в падение внутрь и во вращение вокруг дыры. Чем ближе к черной дыре находится лампа-вспышка, тем сильнее выражено это явление, причем *над* горизонтом событий существует даже область, где расширяющиеся слои света оказываются полностью смещенными от места, в котором лампа испустила свой импульс. В итоге оказывается, что вблизи вращающейся черной дыры предел статичности расположен *выше* горизонта событий. Еще задолго до приближения к горизонту событий космонавт на своем корабле обнаружит, что должен двигаться со скоростью света, чтобы оставаться в покое. Внутри предела статичности он

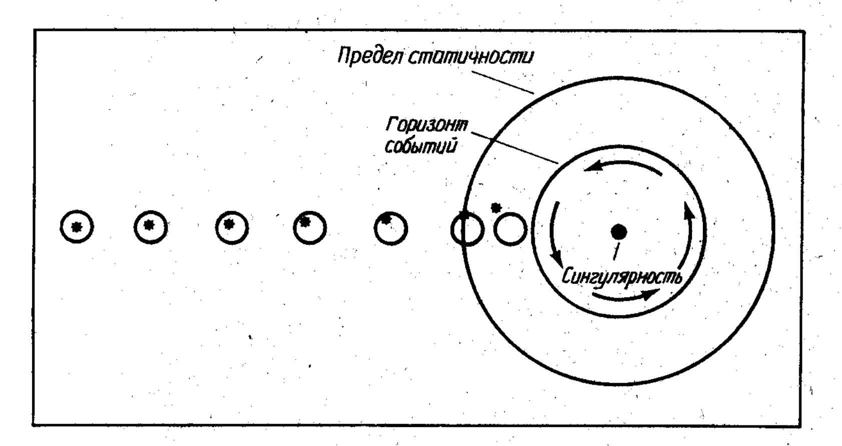


РИС. 11.3.

Вспышки света вблизи вращающейся черной дыры. Расширяющиеся сферические слои света от лампы-вспышки, которую включают около вращающейся черной дыры, сразу затягиваются внутрь дыры и увлекаются в направлении ее вращения. Под влиянием этих двух эффектов предел статичности оказывается *выше* горизонта событий.

окажется вовлеченным в непреодолимое движение *внутрь и вокруг* дыры независимо от мощности двигателей корабля.

Из того факта, что предел статичности вращающейся черной дыры лежит выше ее горизонта событий, вытекают важные следствия. Как и для всех других черных дыр, после пересечения горизонта событий уже невозможно вернуться в свою Вселенную. Однако из любого места выше горизонта событий вернуться в свою Вселенную всегда возможно. Значит, если космонавт опустился ниже предела статичности, он еще может выбраться наружу, если только он не ушел и под горизонт событий. Иными словами, в пространстве-времени вокруг вращающейся черной дыры существует удивительная область, где оставаться в покое невозможно, но которую можно посещать с возвратом назад в свою Вселенную. Эта область расположена между пределом статичности и горизонтом событий и называется *эргосферой*. Схематический разрез эргосферы показан на рис. 11.4.

Одно из самых удивительных свойств эргосферы было открыто в 1969 г. Роджером Пенроузом. Пенроуз выполнил расчет движения тела, падающего в эргосферу вращающейся черной дыры и распадающегося там на две части. Он предположил, что одна часть падает под горизонт событий (и поэтому теряется навсегда), а другая отскакивает обратно в нашу Вселенную. Этот процесс изображен на рис. 11.5. Разумеется, возвращающаяся обратно часть будет меньше, чем первоначальное тело. И все же

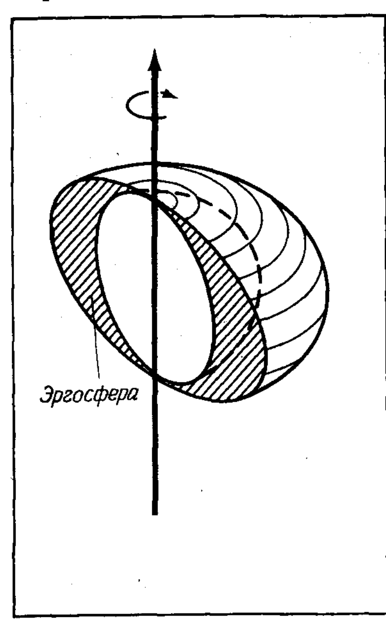


РИС. 11.4.
Эргосфера. Между пределом статичности и горизонтом событий, окружающими вращающуюся черную дыру, находится область пространства-времени, называемая эргосферой. Внутри эргосферы невозможно находиться в состоянии покоя, но туда можно попасть и снова выбраться оттуда, не покидая нашу Вселенную.

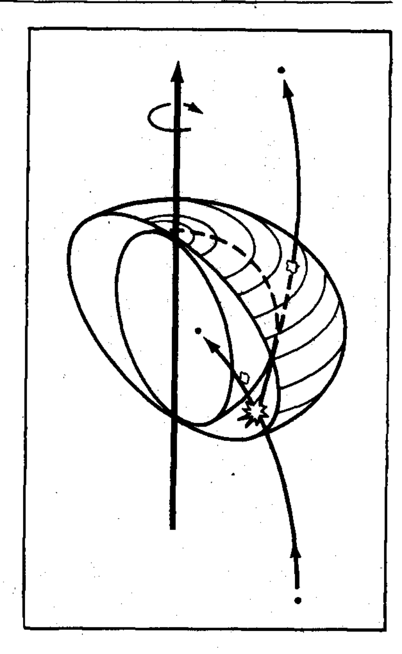


РИС. 11.5.
Механизм Пенроуза. Если влетающая в эргосферу частица распадается там на две части, то часть, выбрасываемая назад из эргосферы, может вынести огромное количество энергии. Захваченная часть тела опускается под горизонт событий и «заглатывается» черной дырой. При этом некоторая доля энергии вращения дыры передается выбрасываемой частице. (По Дж. Уилеру.)

если это тело двигалось точно с нужной скоростью и в нужном направлении, то энергия выброшенной части может стать намного *больше* энергии первоначального объекта. В результате черная дыра станет вращаться немного медленнее. Таким образом от вращающихся черных дыр можно получить большое количество энергии: с помощью рассмотренного здесь механизма Пенроуза часть энергии вращения дыры может быть передана выбрасываемому из эргосферы веществу.

К астрономическим следствиям этого явления мы обратимся в одной из следующих глав, а сейчас обрисуем научно-фантастическое приложение механизма Пенроуза. Допустим, что некая высокоразвитая цивилизация обнаружила в космосе вращающуюся черную дыру и построила вокруг этой дыры город (рис. 11.6). В городе запущена лента конвейера, уходящая в эргосферу, но повсюду остающаяся выше горизонта событий. Круглосуточно грузовики-мусоровозы собирают в городе все отбросы и перегружают их в контейнеры, расположенные на ленте конвейера. Конвейер уносит их в эргосферу, где весь мусор сбрасывается под горизонт событий. Вытряхивание мусора из контейнеров и есть, по сути, распад объекта на две части. Так как мусор поглощается черной дырой, то каждому контейнеру передается некоторая доля энергии вращения дыры. Поэтому лента конвейера испытывает мощное ускорение при каждом сбрасывании. Ее движение становится все более быстрым. Жители города

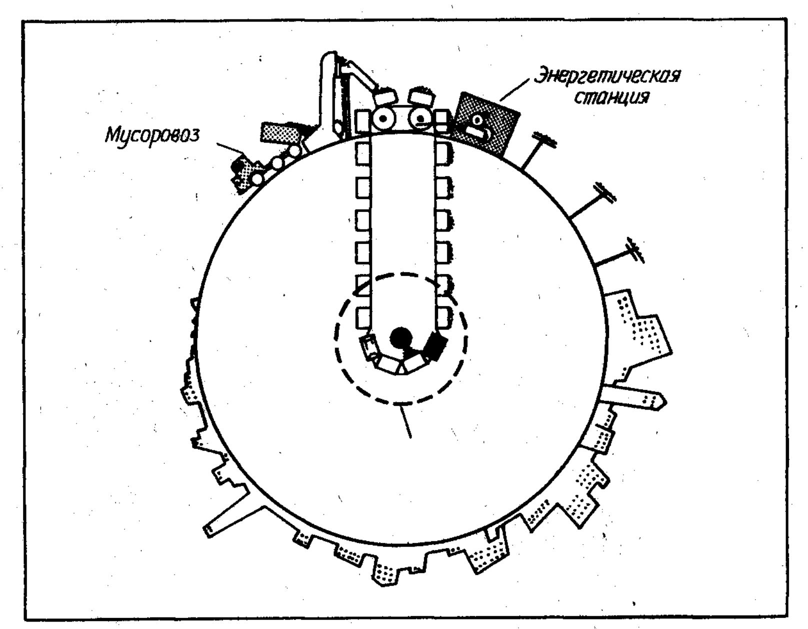


РИС. 11.6.
Город, не загрязняющий окружающую среду. Когда мусор из контейнеров выбрасывается с ленты конвейера в эргосфере, лента конвейера испытывает ускорение. Если присоединить к ней электрогенератор, то можно использовать энергию, извлеченную из черной дыры. (По Мизнеру, Торну и Уилеру.)

вокруг черной дыры подключили к ленте конвейера генератор и получают от него огромное количество энергии!

Другое приложение механизма Пенроуза, хотя и менее фантастическое, но столь же удивительное, было найдено в начале 1970-х годов рядом астрофизиков, в том числе Прессом и Тьюкольским. Подобно тому как частицы могут извлекать энергию из вращающейся черной дыры при пролете через ее эргосферу, может быть усилено и излучение, проходящее мимо такой дыры. Это явление называется *сверхизлучательным рассеянием.* Для иллюстрации представим себе черную дыру, окруженную сферическим зеркалом, как на рис. 11.7. Направим луч света на дыру через небольшое отверстие в зеркале. При многократном отражении в сферическом зеркале свет способен извлекать из черной дыры все большее количество энергии, а черная дыра постепенно замедляет вращение. В итоге через отверстие в окружающем дыру зеркале начинает выходить большое количество излучения – получается почти неисчерпаемый источник энергии. Однако если сразу после поступления первоначального луча отверстие в зеркале заделать, то излучению будет некуда выходить. Постоянно

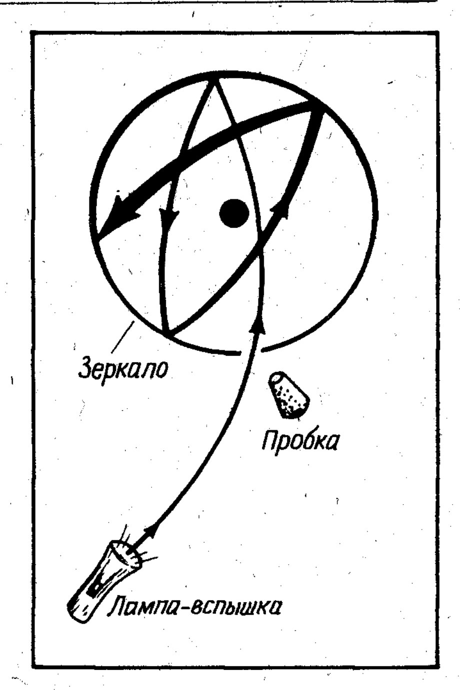


РИС. 11.7.
Сверхизлучательное рассеяние. Проходящий вблизи вращающейся черной дыры свет усиливается. Если окружить такую черную дыру сферическим зеркалом, то излучение можно усилить практически неограниченно. Если в зеркале не будет никаких отверстий, то может произойти такое усиление света, что он разорвет на части зеркало и получится *чернодырная бомба.*

встречаясь со сферическим зеркалом и отражаясь от него, излучение будет становиться все более мощным при каждом прохождении через эргосферу. Поэтому зеркало будет подвергаться все более сильному давлению излучения изнутри, пока напряжения в нем не станут столь велики, что зеркальная сфера взорвется, высвобождая огромное количество накопленной им энергии. Таков механизм чернодырной бомбы!

Помимо того что над вращающейся черной дырой происходят столь необычные вещи, решение Керра таит еще более удивительные неожиданности в «перекошенном» пространстве-времени вблизи сингулярности. В некоторых отношениях геометрия вращающихся черных дыр напоминает геометрию заряженных черных дыр. Поэтому дальше в этой главе будет много общего с анализом решения Райснера – Нордстрёма, проведенным в гл. 10.

Вспомним, что у шварцшильдовской черной дыры имеется сингулярность, окруженная одним-единственным горизонтом событий. Такова простейшая из черных дыр. Черная дыра без вращения *сферически симметрична* – она одинакова во всех направлениях. Однако при «включении» вращения свойства черной дыры уже оказываются *неодинаковы* во всех направлениях: существуют некие «привилегированные» направления. *Ось вращения,*

вокруг которой крутится черная дыра, непохожа на все другие направления. *Экваториальная плоскость* дыры (она рассекает ее на симметричные половины перпендикулярно оси вращения) тоже непохожа на все другие плоскости. Короче говоря, в разных направлениях свойства вращающейся черной дыры различны. Ввиду вращения такой черной дыры вокруг некоторой оси решение Керра называют *осесимметричным* (или *аксиальносимметричным*).

Самые фундаментальные изменения в зависимости от направления во вращающейся черной дыре связаны с сингулярностью. Сингулярность – это всегда то место внутри черной дыры, где искривление пространства-времени бесконечно велико. Как в шварцшильдовской черной дыре, так и в черной дыре Райснера – Нордстрёма сингулярность представляет собою *точку* в центре дыры. Однако когда черная дыра еще и вращается, то природа сингулярности резко меняется. В керровской черной дыре сингулярность – это *кольцо* в середине дыры. Такая *кольцевая сингулярность* лежит в экваториальной плоскости вращающейся черной дыры: центр кольца находится на оси вращения, а само кольцо перпендикулярно оси. Если черная дыра не вращается (т. е. это решение Шварцшильда или Райснера–Нордстрёма), то всякий, направляющийся к центру дыры, наталкивается на сингулярность. Однако в случае вращающейся черной дыры в сингулярность попадает *только тот* космонавт, который летит к дыре в экваториальной плоскости. Кривизна пространства-времени становится бесконечной лишь при подходе со стороны экваториальной плоскости. Двигаясь под любым иным углом, а не в экваториальной плоскости, космонавт *не заметит* бесконечного искривления пространства-времени. Космонавт, приближающийся к центру керровской черной дыры под любым отличным от нуля углом к экваториальной плоскости, *не будет* непременно разорван на части бесконечно большими приливными силами.

Такой кольцевой характер керровской сингулярности – поистине изумительное свойство вращающихся черных дыр. Он означает, что космонавт, летящий к центру керровской черной дыры, может пройти невредимым *сквозь* это кольцо (рис. 11.8). Проскочив сквозь кольцевую сингулярность, космонавт попадает в совершенно новую и странную область пространства-времени, с какой мы еще не встречались. Это – *отрицательное пространство*. Вопреки тому, что говорилось в предыдущих главах, космонавт, пройдя сквозь кольцевую сингулярность, оказывается на *отрицательном расстоянии* от центра черной дыры. Так можно оказаться в «минус десяти километрах» от дыры!

Некоторые физики отвергают саму мысль об отрицательном расстоянии. В поисках другого истолкования этой новой области они обнаружили, что здесь реализуются все свойства антиграви-

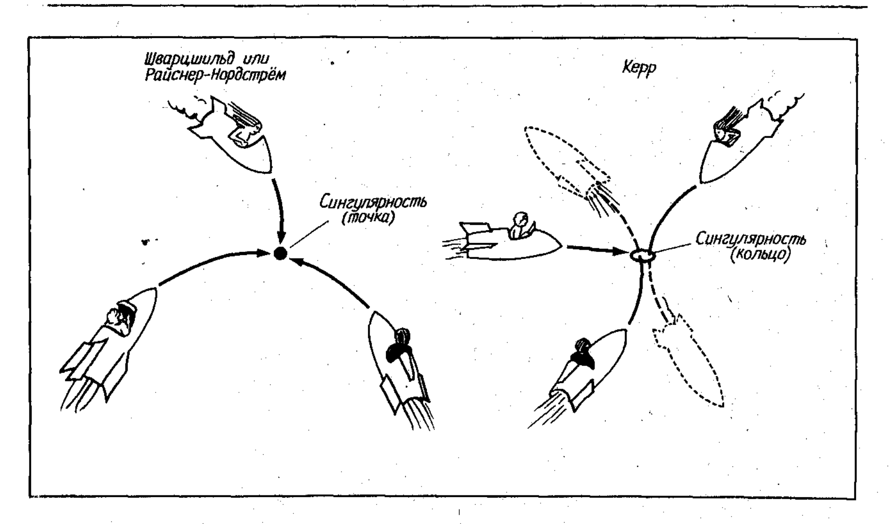


РИС. 11.8.
Сингулярности. В черных дырах, соответствующих решениям Шварцшильда и Райснера – Нордстрёма, сингулярность точечная. С какой бы стороны вы ни летели к центру такой дыры, вас ждет гибель. Однако сингулярность керровской черной дыры – это кольцо, сквозь которое космонавт может попасть в отрицательную Вселенную (в мир антигравитации).

тации – по «другую сторону» кольцевой сингулярности тяготение превращается в отталкивание. В этой области пространства-времени черная дыра отталкивает и вещество, и лучи света. Поэтому говорят об *отрицательной Вселенной* или о *мире антигравитации*. Существование миров антигравитации – самое удивительное свойство вращающихся черных дыр в отличие от дыр заряженных.

Несмотря на резкое различие сингулярностей вращающихся и заряженных черных дыр, поведение горизонтов событий в обоих случаях вполне аналогично. При появлении хотя бы небольшого вращения ($M \gg a$) в непосредственной близости к сингулярности появляется второй горизонт событий. При дальнейшем росте момента количества движения (когда $M > a$) внутренний горизонт событий расширяется, а внешний – сжимается. Когда же черная дыра вращается с такой скоростью, что $M = a$, оба горизонта сливаются в один. Этот случай часто называют *предельной керровской черной дырой*. Если же удается еще ускорить вращение ($M < a$), то всякие горизонты событий исчезают, и у нас остается – в нарушение закона космической этики – *«голая» кольцевая сингулярность*. На рис. 11.9 приведена последовательность схем, изображающих типичное расположение горизонтов событий у черных дыр с одной и той же массой, но с разными скоростями вращения.

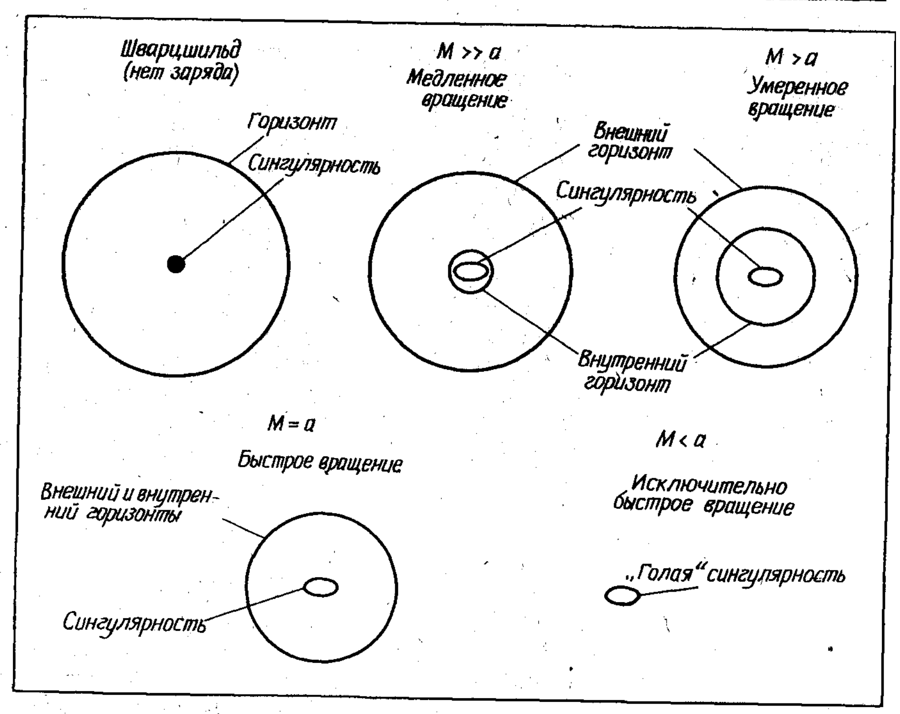


РИС. 11.9.

Изображение керровских черных дыр в пространстве. Когда вращение отсутствует ($a = 0$, решение Шварцшильда), точечную сингулярность окружает только один горизонт событий. При слабом вращении ($M \gg a$) сингулярность становится кольцевой и около нее появляется второй горизонт событий. По мере роста момента количества движения оба горизонта постепенно сближаются. Их слияние происходит в случае предельного решения Керра ($M = a$). При $M < a$ оба горизонта исчезают.

В предыдущей главе мы привели достаточно веские доводы в пользу того, что реальная черная дыра должна быть либо нейтральна, либо ее заряд должен быть очень мал. Вместе с тем мы должны ожидать, что момент количества движения реальной черной дыры будет большим, потому что дыра возникает из массивной вращающейся звезды. Каким же может оказаться момент количества движения реальной черной дыры? Ограничен ли реалистический случай неравенством $M \gg a$, или он должен приближаться к «предельному случаю» $M = a$?

В 1974 г. Кип С. Торн опубликовал результаты расчетов для достаточно реалистических моделей черных дыр. Он показал, что при разумных предположениях черная дыра должна вращаться с некоторой конкретной угловой скоростью, при которой реализуется *каноническое* значение параметра $a = 99{,}8\%\ M$. Это очень

быстрое вращение. Оно оправдывает наши усилия, затраченные на освоение техники построения диаграмм Пенроуза для (нереалистических) заряженных черных дыр.

Чтобы определить характер *глобальной* структуры пространства-времени вблизи вращающейся черной дыры, уместно снова начать с упрощенных диаграмм пространства-времени. Если бы сингулярность была точечной, эти диаграммы были бы аналогичны рассмотренным для решения Райснера–Нордстрёма. Как и прежде, существуют два горизонта событий, постепенно сближающихся по мере роста момента количества движения. Однако теперь сингулярность–это кольцо, сквозь которое космонавты могут попадать в отрицательное пространство. Поэтому диаграммы пространства-времени должны обладать «левой» стороной. Чтобы включить в них расстояния, меньшие нуля, эти диаграммы следует продолжить влево от сингулярности. При этом на диаграммах пространства-времени для вращающейся черной дыры сингулярность изображена пунктирной линией, что отражает необязательность для всех космонавтов, направляющихся к центру керровской черной дыры, испытать бесконечное искривление пространства-времени–это происходит лишь с теми из них, кто движется в экваториальной плоскости дыры. Все прочие проскакивают в отрицательное пространство. Тогда получаются диаграммы пространства-времени, изображенные на рис. 11.10 (ср. с рис. 10.4).

Рассмотрим диаграмму пространства-времени для керровской черной дыры с умеренным моментом импульса ($M > a$). Далеко от черной дыры во внешней Вселенной пространственноподобное и временноподобное направления ориентированы как обычно. Временноподобное направление вертикально (параллельно оси времени), а пространственноподобное–горизонтально (параллельно пространственной оси). Но при пересечении горизонта событий всякий раз происходит смена ролей у пространства и времени. Поэтому между внутренним и внешним горизонтами событий временноподобное направление горизонтально, а пространственноподобное–вертикально, как показано на рис. 11.11. Наконец, после перехода под внутренний горизонт событий роли пространства и времени меняются еще раз. Поэтому повсюду слева от внутреннего горизонта событий на рис. 11.11 временноподобное направление снова вертикально, а пространственноподобное–горизонтально.

Чтобы построить диаграммы Пенроуза для керровских черных дыр, воспользуемся правилами, сформулированными в предыдущей главе. Напомним содержание этих правил: при пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями. Все горизонты событий имеют наклон 45°. Все внешние Вселенные изображаются в виде треугольников, и причем

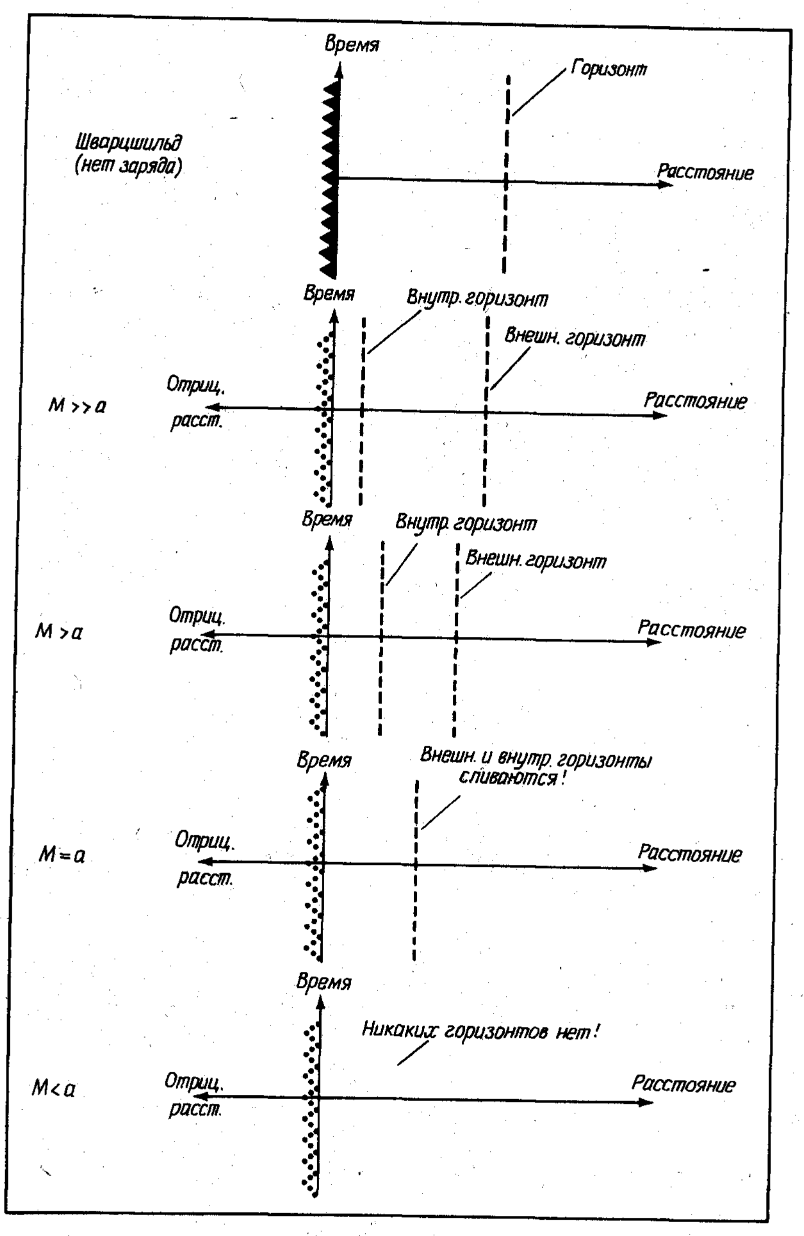


РИС. 11.10.

Диаграммы пространства-времени для керровских черных дыр. На этой серии диаграмм изображена (упрощенно) структура пространства-времени для черных дыр с одной и той же массой (M), но с разными скоростями вращения (a). Сингулярность изображается пунктирной линией; сквозь нее можно перейти в область отрицательных расстояний.

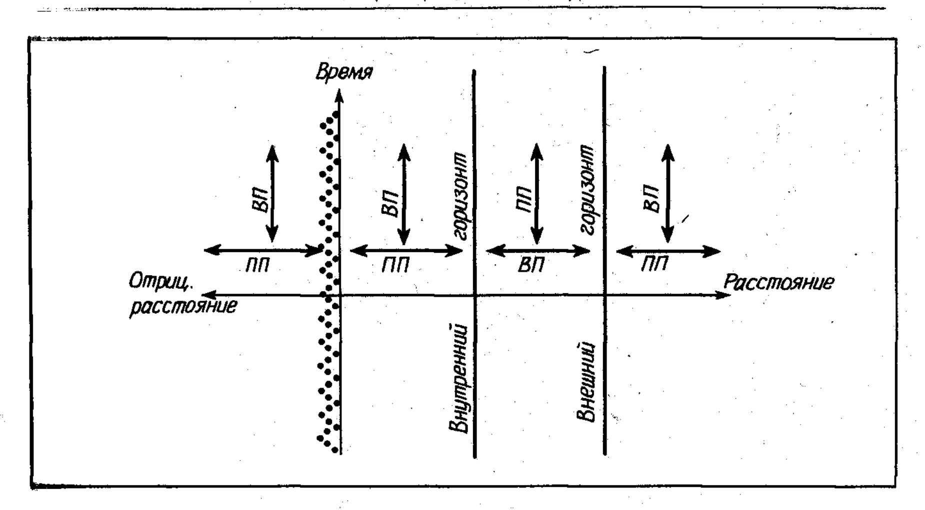


РИС. 11.11.

Диаграмма пространства-времени для керровской черной дыры ($M > a$). На этой диаграмме показана ориентация пространственно- и временноподобных направлений для непредельной керровской черной дыры. Всякий раз при пересечении горизонта событий пространство и время меняются ролями.

каждый имеет по пять бесконечностей (см. рис. 10.6). Поскольку решение Керра сводится к решению Шварцшильда, если остановить вращение черной дыры ($a \rightarrow 0$), то «напротив» нашей Вселенной должна быть другая Вселенная, в которую от нас ведут только пространственноподобные пути. Наконец, так как горизонтов событий два, а потому и смена ролей у пространства и времени происходит дважды, если идти из внешней Вселенной к сингулярности, то сингулярность должна быть временноподобной. На диаграмме Пенроуза ее мировая линия должна быть направлена по вертикали.

При сборке из «запасных частей» конформной карты пространства-времени представим себе сначала космонавта, вылетевшего с Земли и отправившегося к вращающейся черной дыре. Он пересекает внешний горизонт событий, а затем проваливается и сквозь внутренний горизонт событий. Как показано на рис. 11.12, наша Вселенная, как обычно, изображена в виде треугольника, а горизонт событий наклонен под углом 45°.

После пересечения внутреннего горизонта событий космонавт стоит перед разными возможностями. Если, к несчастью, он оказался в экваториальной плоскости, то он может врезаться в сингулярность, которая на диаграмме Пенроуза должна быть изображена по вертикали (быть временноподобной). Но если он приближается к центру дыры под углом к экваториальной плоскости, то проскакивает сквозь кольцевую сингулярность в отри-

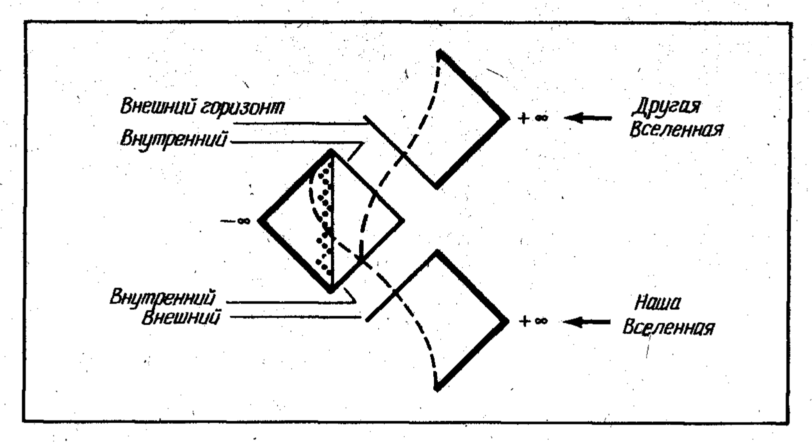


РИС. 11.12.
Часть диаграммы Пенроуза. Глобальную структуру пространства-времени легче понять, проследив за космонавтом, летящим во вращающуюся черную дыру. Здесь показано путешествие космонавта, вылетевшего с Земли в нашей Вселенной. (Ср. с рис. 10.8.)

цательную Вселенную. Сингулярность изображена пунктирной линией, чтобы подчеркнуть, что космонавт уцелел при переходе сквозь кольцо. На конформной карте отрицательная Вселенная изображена, как обычно, в виде треугольника.

Так как сингулярность временноподобна и поэтому изображается в виде вертикали, у космонавта есть полная возможность избежать сингулярности, попросту направив свой космический корабль вовне от нее. Покидая черную дыру, он проходит через внутренний горизонт событий, а затем выходит и за внешний горизонт событий. Так он оказывается во Вселенной будущего. Он может остаться в этой новой Вселенной и посетить в ней какие-либо планеты, но может повернуть назад и снова скрыться в черной дыре на пути ко все новым и новым Вселенным будущего.

Чтобы прийти к остальным частям диаграммы Пенроуза, заметим, что, если бы черная дыра прекратила вращение, все свелось бы к геометрии Шварцшильда (см. рис. 9.18). Это значит, что должна существовать еще другая Вселенная, противоположная нашей, достижимая лишь по пространственноподобным (запретным) путям. Поэтому нам придется рассмотреть путешествие «чужого» космонавта, вылетевшего с планеты этой «чужой» Вселенной и нырнувшего во вращающуюся черную дыру на летающей тарелочке. Перед ним будут стоять те же альтернативы, что и перед космонавтом с Земли. Как видно из рис. 11.13, чужак может врезаться в сингулярность, если полетит в экваториальной плоскости, или попасть в отрицательную Вселенную сквозь кольцо с сингулярностью, если будет приближаться к нему под

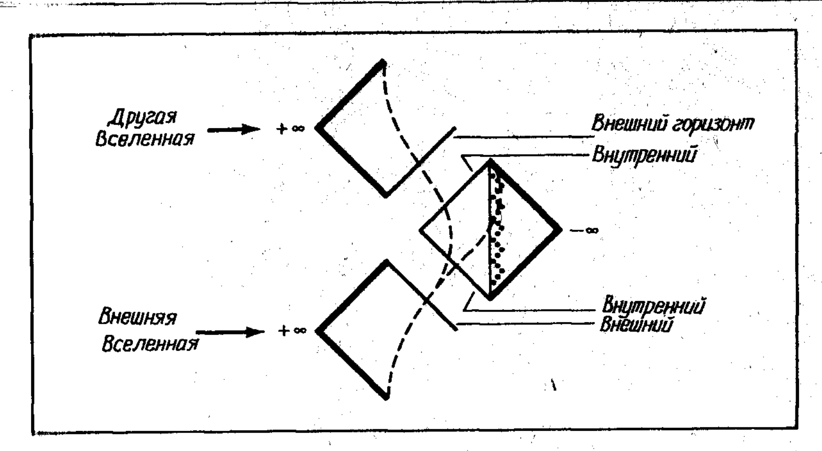


РИС. 11.13.
Другая часть диаграммы Пенроуза. Другую часть диаграммы Пенроуза можно построить, следя за полетом чужого космонавта (разумеется, на летающей тарелке), который отправился во вращающуюся черную дыру из чужой Вселенной. (Ср. с рис. 10.9.)

углом. Кроме того, он может пересекать горизонты событий в ту и другую стороны, посещая всевозможные Вселенные будущего.

Наконец, чтобы получить полную картину, оба этих фрагмента (рис. 11.12 и 11.13) нужно сложить вмес е. Окончательная диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры представлена на рис. 11.14. Так как космонавт может бесконечное число раз пересекать горизонты событий, проходя из одной Вселенной в другую, то диаграмма должна быть продолжена до бесконечности в будущее и в прошлое.

Заметим, что полученная диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры при $M > a$ очень похожа на диаграмму Пенроуза для черной дыры Райснера–Нордстрёма при $M > |Q|$, изображенную на рис. 10.10. Существует лишь одно важное отличие. В заряженной черной дыре сингулярность точечная, и на каждого, приближающегося к центру такой дыры, будет воздействовать бесконечно сильное искривление пространства-времени, так что нечего и надеяться попасть там в отрицательное пространство. Однако в случае вращающейся черной дыры попасть в отрицательное пространство можно, если пройти сквозь кольцевую сингулярность. Лишь тот горе-космонавт, который полетит в экваториальной плоскости, будет разорван на части приливными силами. Поэтому на диаграмме Пенроуза для керровской черной дыры сингулярность изображена пунктирными линиями. Она является дверью в миры антигравитации.

В случае решения Райснера–Нордстрёма трем возможным вариантам ($M > |Q|$, $M = |Q|$ и $M < |Q|$) соответствовали диа-

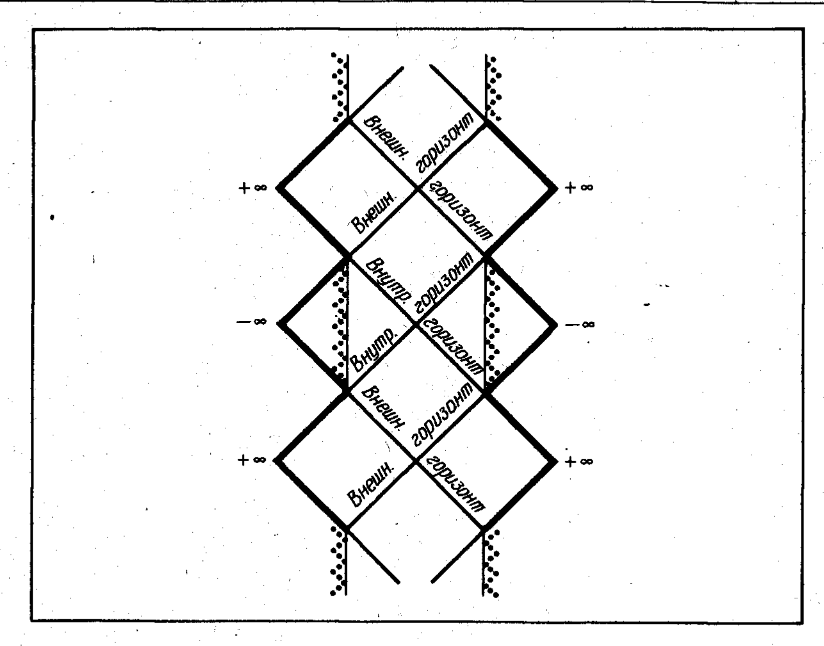


РИС. 11.14.

Полная диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры ($M > a$). Эта полная диаграмма Пенроуза получается при объединении фрагментов, показанных на рис. 11.12 и 11.13. Следует рассматривать ее как повторяющуюся до бесконечности в будущее и в прошлое, подобно ленте с трафаретным рисунком. (Ср. с рис. 10.10.)

граммы Пенроуза резко различного вида. Точно так же и для решения Керра диаграммы Пенроуза, соответствующие трем разным вариантам ($M > a$, $M = a$ и $M < a$), сильно отличаются друг от друга. Описанные выше рассуждения, на основе которых мы получили рис. 11.14, относились к случаю малых или умеренных значений момента импульса ($M > a$). Чтобы проанализировать предельную геометрию Керра ($M = a$), возвратимся снова к упрощенной диаграмме пространства-времени. В случае предельной керровской черной дыры внутренний и внешний горизонты событий сливаются в один. При этом промежуточная область между горизонтами исчезает. Поэтому, как показано на рис. 11.15, при пересечении нового (двойного) горизонта событий в целом смены пространственноподобного направления на временноподобное и наоборот не происходит. Временноподобное направление повсюду вертикально, а пространственноподобное – горизонтально.

Чтобы построить диаграмму Пенроуза для предельной керровской черной дыры, рассмотрим снова космонавта, вылетевше-

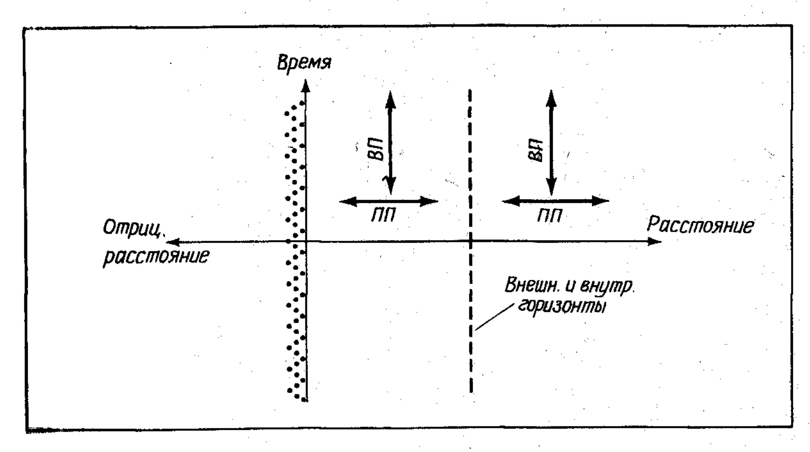


РИС. 11.15.

Диаграмма пространства-времени для предельной керровской черной дыры ($M = a$). Если черная дыра вращается столь быстро, что $M = a$, внутренний и внешний горизонты событий сливаются. Область, существовавшая между этими горизонтами, теперь исчезает, и при пересечении такого (двойного) горизонта пространственноподобное и временноподобное направления не испытывают изменений.

го с Земли и нырнувшего в черную дыру. После пересечения всего лишь одного горизонта событий он встречается с сингулярностью. Однако, так как пространственноподобное и временноподобное направления в целом не меняются ролями, сингулярность должна быть временноподобной и изображаться на диаграмме Пенроуза вертикалью. У космонавта теперь имеются разные возможности. При полете в экваториальной плоскости он может наткнуться на сингулярность, где заведомо жизнь станет ему не мила. Однако космонавт может приблизиться к центру черной дыры и под углом к экваториальной плоскости. В этом случае он пройдет сквозь кольцевую сингулярность и вынырнет в мире антигравитации, изображенном, как обычно, в виде треугольника. Он может выбрать и третью возможность – вообще уклониться от центра черной дыры, повернуть назад и выйти сквозь горизонт событий в обычную Вселенную будущего, как показано на рис. 11.16. После этого он может либо остаться в этой новой Вселенной, нанося визиты на ее планеты, либо вернуться в черную дыру и снова сделать выбор между теми же альтернативами. Поэтому диаграмма Пенроуза бесконечно продолжается как в прошлое, так и в будущее.

Отметим снова, что диаграмма Пенроуза для предельного решения Керра очень похожа на предельную диаграмму решения Райснера – Нордстрёма. Основным (и единственным) отличием

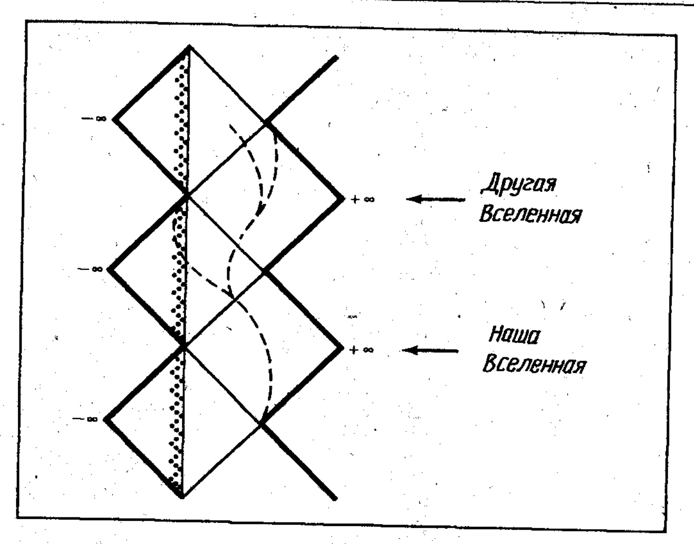


РИС. 11.16.

Диаграмма Пенроуза для предельной керровской черной дыры ($M = a$). Конформную карту предельной керровской черной дыры можно получить, прослеживая возможные мировые линии космонавта. Как обычно, диаграмма повторяется бесконечное число раз в будущее и в прошлое. (Ср. с рис. 10.13.)

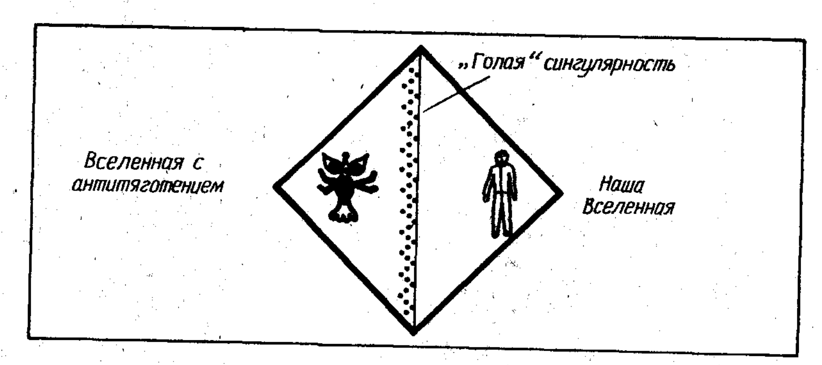


РИС. 11.17.

«Голая» керровская сингулярность. Если черная дыра вращается настолько быстро, что $a > M$, оба горизонта событий исчезают, открывая для обозрения «голую» сингулярность. Космонавты могут путешествовать сквозь кольцевую сингулярность, разграничивающую нашу Вселенную и мир антигравитации.

является то, что теперь можно пройти сквозь керровскую сингулярность в миры антигравитации.

Наконец, если черная дыра вращается настолько быстро, что $M < a$, горизонты событий пропадают и «голая» сингулярность открывается взорам внешней Вселенной. Однако, в отличие от случая «голой» сингулярности Райснера – Нордстрёма, космонавт теперь может пройти сквозь кольцевую сингулярность и вынырнуть в мире антигравитации. Так получается диаграмма Пенроуза, показанная на рис. 11.17 и имеющая очень простой вид. При этом астроном может наблюдать свет, приходящий через кольцевую сингулярность из мира антигравитации. В свою очередь «чужой» астроном из мира антигравитации может наблюдать свет, приходящий из нашей Вселенной.

Поскольку реальные черные дыры должны вращаться и поэтому их следует описывать с помощью геометрии Керра, поучительно проанализировать решения Керра поподробнее. В следующей главе мы специально уделим внимание тому, что увидят астрономы и космонавты при наблюдении и исследовании вращающихся черных дыр.

12

ГЕОМЕТРИЯ РЕШЕНИЯ КЕРРА

Астрофизики-теоретики часто сталкиваются в своих математических построениях с разными возможностями. Они могут облегчить или, наоборот, усложнить себе жизнь, если представят рассматриваемые уравнения в удобном для работы или, напротив, в громоздком виде. И это особенно верно по отношению к анализу геометрии вращающихся черных дыр.

При описании геометрии пространства в окрестностях керровской черной дыры физики могут по-разному выбирать способы для описания положения точек в этой окрестности. Речь идет о выборе *системы координат*, т.е. попросту о выборе сетки, которая покрывает пространство. Например, физик может ввести прямоугольные декартовы координаты. Такие координаты, изображенные в левой стороне рис. 12.1, выглядят как линии на обычной миллиметровке. Положение точки задается в прямоугольных координатах посредством указания расстояний в направлениях вверх-вниз и налево-направо.

Однако было бы весьма неразумно, если бы для описания пространства вблизи черной дыры физик выбрал прямоугольные декартовы координаты. Такие координаты удобны, чтобы описывать тела, которые сами обладают прямыми углами, а черные дыры совсем не похожи на кирпичи. Прямоугольные координаты не отражают свойств симметрии черных дыр, и физик не получит с их помощью удобных для работы уравнений.

Второй возможный выбор состоит в использовании полярных (или сферических) координат. В центре рис. 12.1 показан пример подобных координат с центром в некоторой выбранной точке. Положение другой точки задается в этих координатах расстоянием от центра и величиной угла.

Сферические координаты (т.е. полярные, обобщенные на три измерения) предпочтительны во всех тех случаях, когда имеет место сферическая симметрия. Шварцшильдовские черные дыры и черные дыры Райснера–Нордстрёма обладают сферической симметрией. Поэтому сферические координаты идеально подходят для описания пространства решений Шварцшильда и Райсне-

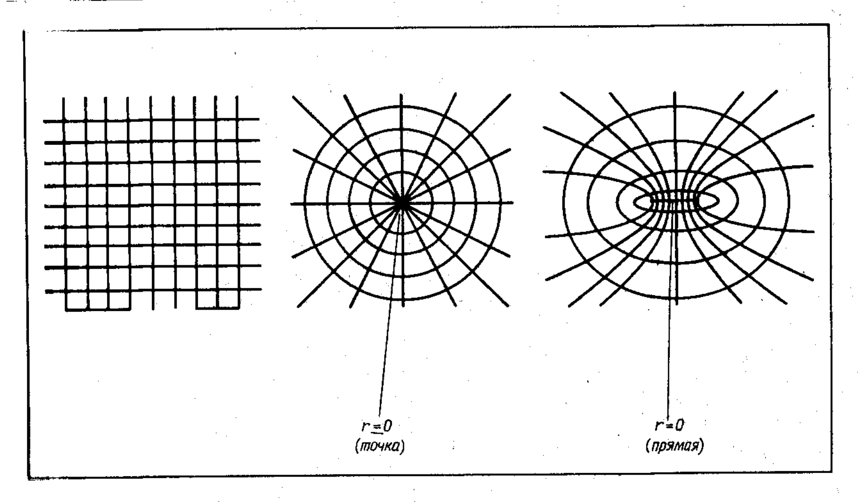


РИС. 12.1.
Разные системы координат (слева–декартовы прямоугольные, в середине–полярные, справа–эллипсоидальные). Система координат–это всего лишь сетка, с помощью которой определяют положение точек в пространстве. Для вращающихся черных дыр удобно выбрать эллипсоидальные координаты (они получаются при вращении правого рисунка вокруг его оси симметрии). Такая система координат лучше всего отражает особенности геометрии решения Керра.

ра–Нордстрёма, так что в сферических координатах уравнения принимают тогда особенно простой вид.

Если для сферически симметричных черных дыр сферические координаты превосходно себя оправдывают, то они оказываются уже не столь удобными в случае решения Керра. Вращающаяся черная дыра *не является* сферически симметричной. У нее существует привилегированное направление–ось вращения, вокруг которой она вращается. Чтобы работать с решением Керра, физикам необходимо выбрать такую систему координат, которая наиболее полно отражает геометрию вращающейся черной дыры; в противном случае придется иметь дело со слишком сложными уравнениями.

Имеется еще одна система координат, как будто специально придуманная для решения Керра. Для случая двух измерений эти координаты называются эллиптическими и изображены справа на рис. 12.1. По сути дела, положения точек определяются здесь заданием расстояния от прямой и величиной некоторого угла. Кривые равного расстояния от прямой–это эллипсы, а кривые постоянного угла–гиперболы. Можно сказать, что эллиптические координаты–это полярные координаты, у которых центр (начало координат) вытянут в линию.

Чтобы прийти к системе трехмерных координат, удобной для

работы с решением Керра, представим себе, что мы вращаем эл-липтические координаты вокруг оси симметрии. Эллипсы стано-вятся тогда эллипсоидами вращения, а гиперболы – гиперболои-дами. Концы отрезка линии, находившегося в центре, вычертят кольцо. У нас получилась трехмерная система координат, ко-торые называются *сплющенными эллипсоидальными координата-ми*; они изображены на рис. 12.2.

Сплющенные эллипсоидальные координаты идеально подхо-дят для описания решения Керра. Эта система координат имеет осевую симметрию, как и сама вращающаяся черная дыра. В центре системы расположено кольцо, а керровская сингуляр-ность – это тоже кольцо. Вот почему хитроумные физики поль-зуются в данном случае именно сплющенными эллипсоидальны-ми координатами. Хотя мы здесь не будем проводить никаких вычислений, важно отметить основные свойства подобных координат. Если посмотреть на центральную часть таких коор-динат вдоль оси вращения, то видно, что координатные линии равного расстояния (или соответствующие места в керровской черной дыре) представляют собой окружности. Глядя же вдоль экваториальной плоскости, мы замечаем, что эти координатные линии (как и керровская черная дыра в этом сечении) выглядят как эллипсы (рис. 12.2).

При описании в гл. 8 особенностей шварцшильдовской черной дыры было очень важно проследить пути световых лучей, как это сделано, например, на рис. 8.1. Когда лучи проходят вблизи черной дыры, они отклоняются в искривленном пространстве-времени. Далее лучи света, приближающиеся к черной дыре точ-но на определенное расстояние, захватываются на *круговую* ор-

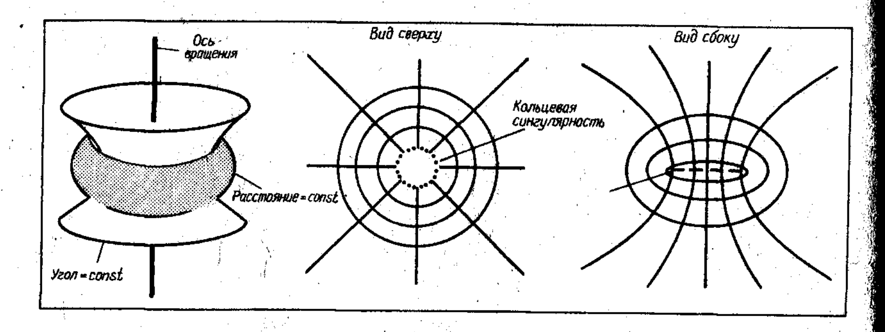


РИС. 12.2.

Сплющенные эллипсоидальные координаты. Сплющенные эллипсоидальные коор-динаты получаются, если вращать эллипсоидальные координаты на плоскости вокруг оси симметрии. Центр координатной системы – это кольцо. Такая осесим-метричная система идеально подходит для описания решения Керра, поскольку керровская сингулярность кольцеобразна.

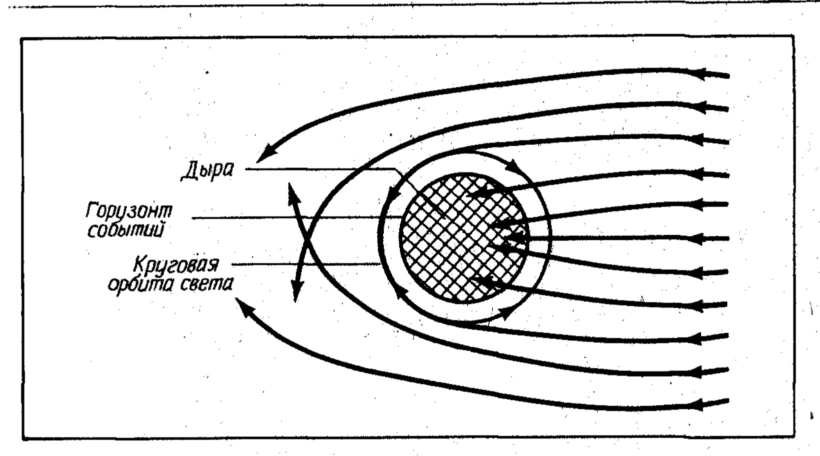


РИС. 12.3.

Орбиты света вокруг шварцшильдовской черной дыры. Невращающаяся черная дыра окружена сферой неустойчивых круговых орбит света. *Всякий* луч света, который приблизится к такой дыре точно на нужное расстояние, может быть за-хвачен на круговую орбиту на фотонной сфере.

биту вокруг дыры. В результате возникает *фотонная сфера* – сфе-рическая поверхность, образованная неустойчивыми круговыми орбитами световых лучей. Для иллюстрации на рис. 12.3 приве-дены траектории лучей света вблизи шварцшильдовской черной дыры.

Важно подчеркнуть то, что вокруг шварцшильдовской черной дыры имеется лишь *единственная* фотонная сфера. Существует только одно расстояние от горизонта событий, на котором мо-гут проходить круговые орбиты световых лучей. К тому же лучи света движутся на фотонной сфере вокруг дыры под всевоз-можными углами, в том числе и по, и против часовой стрелки. Чтобы луч света оказался захваченным на подходе к черной ды-ре, он должен всего-навсего оказаться на нужном расстоянии от нее, однако не имеет значения направление его прихода. Угол, под которым свет подходит к дыре, не играет никакой роли. Де-ло в том, что шварцшильдовская дыра сферически симметрична, и для нее нет «верха» и «низа», «правой» и «левой» сторон. Един-ственное, что существенно, – это расстояние луча света от дыры, или *прицельный параметр.* Если прицельный параметр имеет нужную величину, то луч попадет *на одну и ту же* фотонную сферу, как и все иные лучи с тем же значением параметра, неза-висимо от того, откуда они пришли.

Но если черная дыра вращается, все меняется. В случае кер-ровской черной дыры ее ось вращения определяет особое направление в пространстве, так что пространство-время оказы-вается искривленным по-разному в зависимости от угла к оси

вращения. Теперь геометрия пространства *осесимметрична*, а не сферически симметрична. Это усложнение приводит к радикальным изменениям характера круговых орбит лучей света.

Чтобы разобраться в расположении орбит света вокруг керровской черной дыры, представим себе, что мы смотрим вдоль оси вращения в сторону черной дыры на лучи света, идущие к ней в экваториальной плоскости. Как видно из рис. 12.4, лучи света, проходящие вдали от дыры (т. е. при больших значениях прицельного параметра), отклоняются лишь немного. Когда прицельный параметр имеет строго определенное значение, луч света и в данном случае может пойти по круговой орбите вокруг черной дыры. Однако теперь появляются *две* возможности. Если луч света приближается к черной дыре с одной стороны, он может быть захвачен на неустойчивую круговую орбиту, по которой он обращается в направлении, противоположном направлению вращения дыры. Такая *круговая орбита с обратным вращением* расположена на большем расстоянии от черной дыры, чем фотонная сфера в шварцшильдовском случае.

Если же луч света приближается к черной дыре с другой стороны, он также может быть захвачен на неустойчивую круговую орбиту, но теперь луч обращается в том же направлении, в каком вращается сама дыра. Такая *круговая орбита с прямым вращением* расположена намного ближе к дыре – ближе, чем фотонная сфера в шварцшильдовском случае.

Анализ поведения лучей света в экваториальной плоскости показывает, что существуют две круговые орбиты – внутренняя, по которой свет обращается в ту же сторону, в которую вращается черная дыра, и внешняя, по которой свет обращается в противоположную сторону. Можно сказать, что, когда шварцшильдовская черная дыра приобретает момент количества движения, фотонная сфера «расщепляется» на две. Между орбитами с прямым и обратным вращением в экваториальной плоскости имеется множество неустойчивых круговых орбит для световых лучей. Эти орбиты соответствуют световым лучам, приходящим к черной дыре с разных направлений, не лежащих в экваториальной плоскости.

Для того чтобы разобраться, что же происходит вне экваториальной плоскости, рассмотрим световые лучи, приближающиеся к черной дыре параллельно ее оси вращения. На рис. 12.5 изображены траектории таких лучей в окрестностях предельной черной дыры ($M = a$), вычисленные Ч. Т. Каннингэмом. Если на рис. 12.4 изображен «вид сверху», а именно орбиты, лежащие в экваториальной плоскости, то рис. 12.5 – это «вид сбоку» на орбиты световых лучей в плоскости, проходящей через ось, вокруг которой вращается черная дыра.

Как всегда, лучи света, проходящие вдалеке от черной дыры,

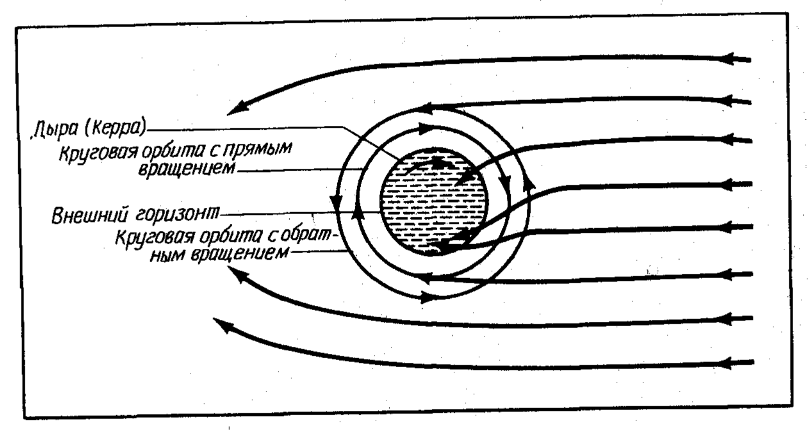


РИС. 12.4.

Орбиты вокруг света керровской черной дыры (в ее экваториальной плоскости). Те лучи света, которые проходят далеко от вращающейся черной дыры, отклоняются лишь на малые углы. Луч света, приближающийся к дыре с требуемым значением прицельного параметра, может направиться по круговой орбите вокруг этой дыры. Но в экваториальной плоскости есть *две* неустойчивые круговые орбиты света. Внешняя орбита содержит лучи с обратным вращением, и внутренняя – с прямым.

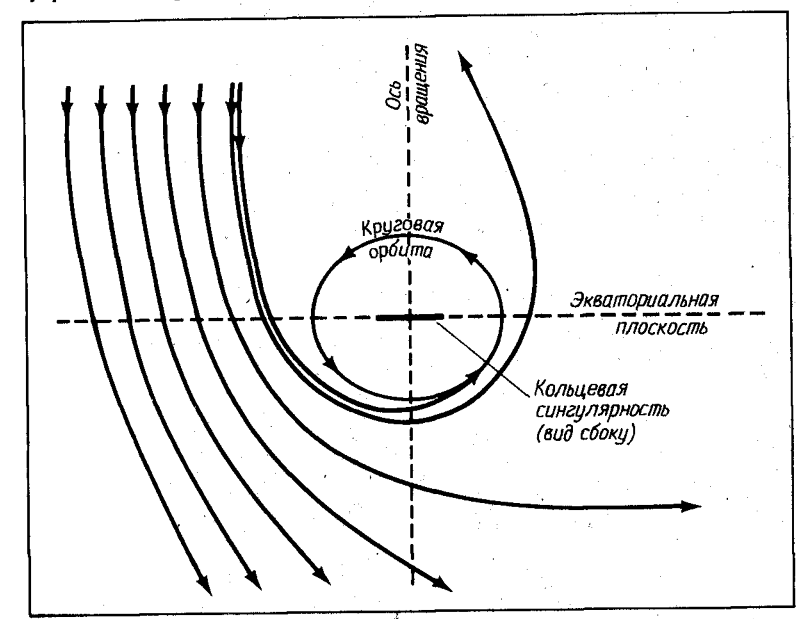


РИС. 12.5.

Орбиты света вокруг керровской черной дыры (параллельно оси вращения). Те лучи света, которые проходят далеко от вращающейся черной дыры, отклоняются лишь на малые углы. Для луча света, пришедшего к дыре параллельно ее оси вращения, существует только одна возможная круговая орбита. (Диаграмма построена для предельного решения Керра, когда $M = a$.)

отклоняются лишь на малые углы. Лучи, прицельные параметры которых меньше (т. е. которые проходят ближе к оси вращения), отклоняются сильнее. Теперь среди всех значений прицельного параметра существует лишь *одно*, при котором свет захватывается на круговую орбиту вокруг дыры (см. рис. 12.5). Итак, для лучей, подходящих к черной дыре параллельно ее оси вращения, существует только *одна* неустойчивая круговая орбита. Эта орбита находится от черной дыры на расстоянии, промежуточном между расстояниями для орбит в экваториальной плоскости с прямым и обратным вращением. Если вас смутит тот факт, что на рис. 12.5 эта «круговая» орбита имеет вид эллипса, то вспомните, что используются *сплющенные* эллипсоидальные координаты. Если смотреть на эти координаты «в профиль» (см. рис. 12.2), то линии постоянного расстояния от кольцевой сингулярности оказываются эллипсами.

В определенном смысле рис. 12.5 дает слишком упрощенную картину. Пространство-время в окрестностях вращающейся черной дыры увлекается в сторону ее вращения. И хотя на рис. 12.5 верно изображены расстояния от черной дыры падающих на нее лучей света, этим и исчерпывается правильность рисунка. На самом деле луч, приближаясь к черной дыре, начинает обращаться вокруг нее по спирали в силу эффекта увлечения инерциальных систем. На рис. 12.6 показано, как увлечение действует на некий конкретный луч. В целом траектория движения луча света в трехмерном пространстве представляет собою сложную спираль. Следовательно, чтобы получить полную картину происходящего с лучами света, приближающимися к черной дыре, следует вращать рис. 12.5 (и любую другую подобную схему) вокруг оси вращения черной дыры. Тем не менее схемы типа приведенной на рис. 12.5 дают достаточно хорошее представление о том, как меняется расстояние (и только расстояние) луча света от черной дыры.

Итак, вокруг черной дыры существует множество различных неустойчивых круговых орбит световых лучей. Самая далекая из них – это круговая орбита с обратным вращением в экваториальной плоскости. Самая близкая – круговая орбита с прямым вращением, опять-таки в экваториальной плоскости. Между этими двумя пределами находятся различные возможные орбиты лучей света, подошедших к черной дыре под разными углами. Для каждого данного угла будут существовать орбиты как с прямым, так и с обратным вращением, за исключением тех лучей, которые пришли параллельно оси вращения. Для луча света, подошедшего к черной дыре параллельно ее оси вращения, имеется лишь одна круговая орбита.

Если черная дыра вращается медленно, то разброс круговых орбит невелик. Все возможные орбиты расположены друг около

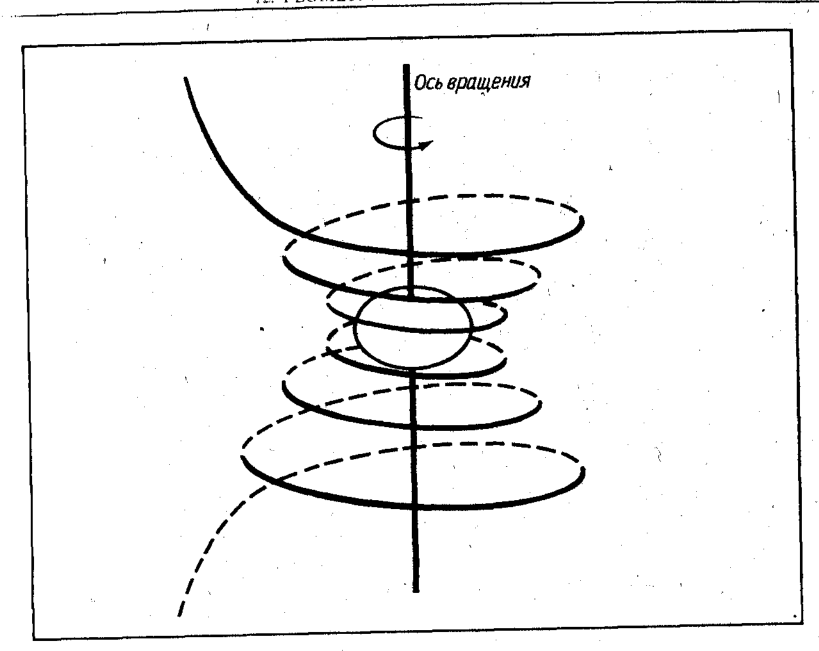


РИС. 12.6.

Луч света, проходящий мимо керровской черной дыры. При прохождении луча света вблизи вращающейся черной дыры его траектория закручивается вокруг дыры вследствие увлечения пространства-времени. Поэтому, чтобы обрисовать реальные траектории в трехмерном пространстве, орбиты, изображенные на рис. 12.5 (и на всех подобных схемах), необходимо вращать вокруг оси черной дыры.

друга над внешним горизонтом событий на расстояниях, близких к положению шварцшильдовской фотонной сферы (которая существовала бы, *если бы* дыра не вращалась). При более быстром вращении черной дыры расстояние между орбитами в экваториальной плоскости с прямым и обратным вращением становится больше. Соответственно увеличивается и разброс радиусов круговых орбит. Наибольший возможный разброс имеет место для предельной керровской черной дыры (когда $M = a$).

Для наглядного представления разброса круговых орбит света вблизи вращающейся черной дыры удобнее всего изобразить *огибающую поверхность* всех таких орбит, состоящую из двух частей – внешней и внутренней. На рис. 12.7 изображено сечение огибающей поверхности всех возможных круговых орбит вокруг быстро вращающейся керровской дыры ($a = 90\% M$). Каждый луч света движется весьма сложным образом вдоль поверхности эллиптического кольца внутри этих границ. При потере момента количества движения черной дырой по мере замедления вращения должен уменьшаться и объем, заключенный между частями

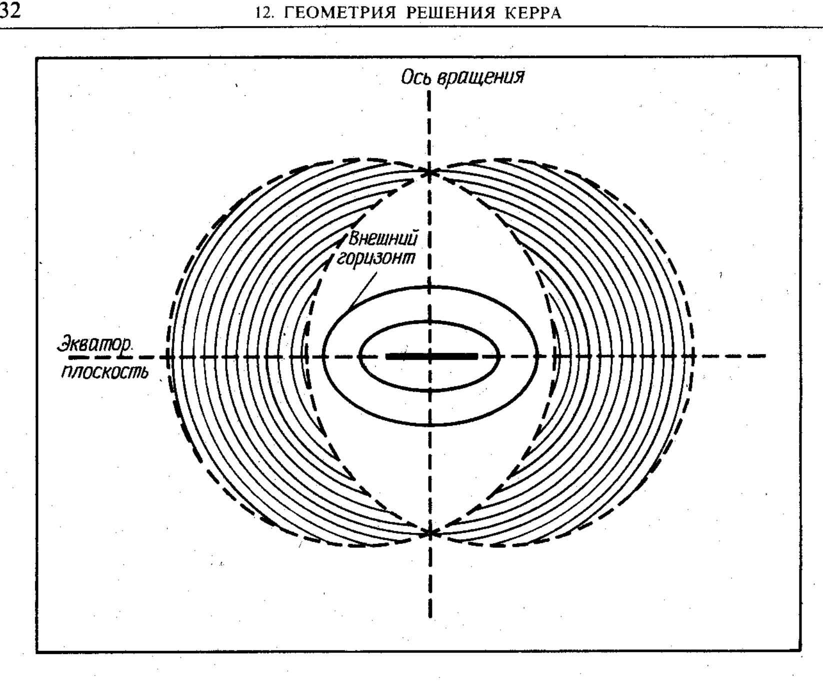


РИС. 12.7.

Разброс круговых орбит света вблизи быстро вращающейся черной дыры. Все возможные круговые орбиты света вблизи керровской черной дыры (при $a = 90\% M$) лежат внутри показанных здесь границ. Каждый луч света, идущий по круговой орбите, весьма сложным образом искривляется, оставаясь на поверхности эллипсоида внутри указанных границ.

огибающей поверхности. При полной остановке вращения вся огибающая поверхность превращается в фотонную сферу шварцшильдовской черной дыры.

До сих пор мы касались лишь того, что происходит *вне* керровской черной дыры. Чтобы познакомиться с геометрией внутри такой дыры, представим себе, что мы послали световой луч с прицельным расстоянием меньше требуемого для захвата на круговую орбиту. На рис. 12.8 изображены лучи света, подходящие к керровской черной дыре параллельно ее оси вращения, причем значение прицельного параметра меньше, чем требуется для захвата луча на круговую орбиту. Рис. 12.8 – это просто продолжение рис. 12.5, и он также основан на расчетах Каннингэма. Отметим тот важный факт, что траектории этих лучей света вблизи центра черной дыры *поворачивают* и идут от сингулярности. Если вдали от керровской черной дыры гравитация вызывает притяжение и затягивает все тела вовнутрь, то вблизи сингулярности она действует как сила отталкивания и стремится вытолкнуть их наружу! Те лучи света, которые нацелены прямо

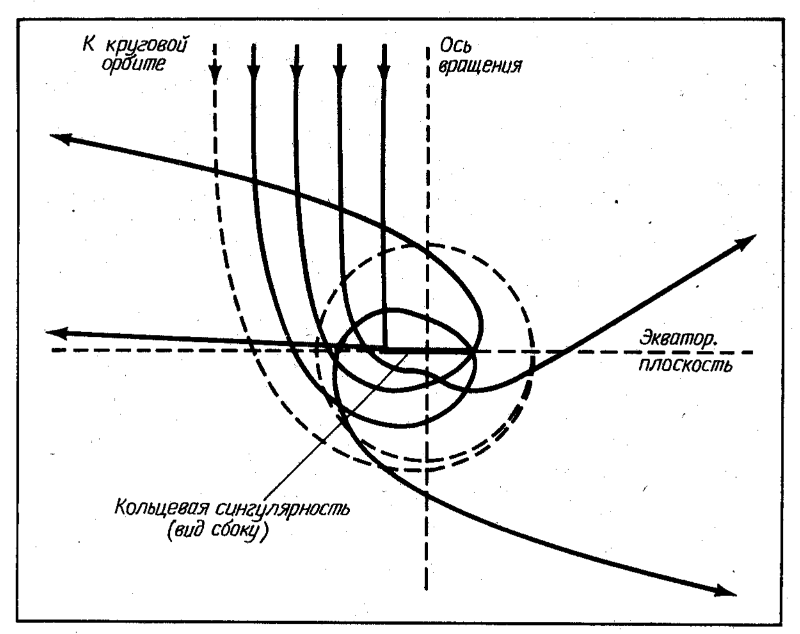


РИС. 12.8.

Траектории лучей света внутри керровской черной дыры. Те лучи света, которые направлены на вращающуюся черную дыру при меньшем, чем для круговой орбиты, значении прицельного параметра, попадают внутрь дыры. Вид траекторий лучей света глубоко внутри дыры показывает, что сингулярность отталкивает световые лучи. Вблизи сингулярности лучи света испытывают действие антигравитации. (Схема построена для предельного решения Керра, когда $M = a$.)

на кольцо, отклоняются сильнее всего – такие лучи буквально отскакивают от черной дыры. Эта «отталкивательная» природа керровской сингулярности означает, что на некотором расстоянии от центра дыры гравитационное отталкивание уравновешивает гравитационное притяжение. Значит, в этой нейтральной области снова скажутся возможными круговые орбиты света! На рис. 12.9 представлены границы всех возможных круговых орбит света глубоко под внутренним горизонтом событий. В отличие от внешних световых орбит вокруг черной дыры, во внутренней области могут существовать не только неустойчивые, но и устойчивые орбиты. Поэтому сингулярность керровской черной дыры окружена световыми лучами.

Чтобы исследовать самые глубокие области керровской черной дыры, вообразим, что мы посылаем лучи света параллельно оси вращения и *очень близко* к ней, так что значение прицельного параметра для этих лучей света меньше, чем необходимое для попадания в кольцевую сингулярность. Поэтому лучи света, иду-

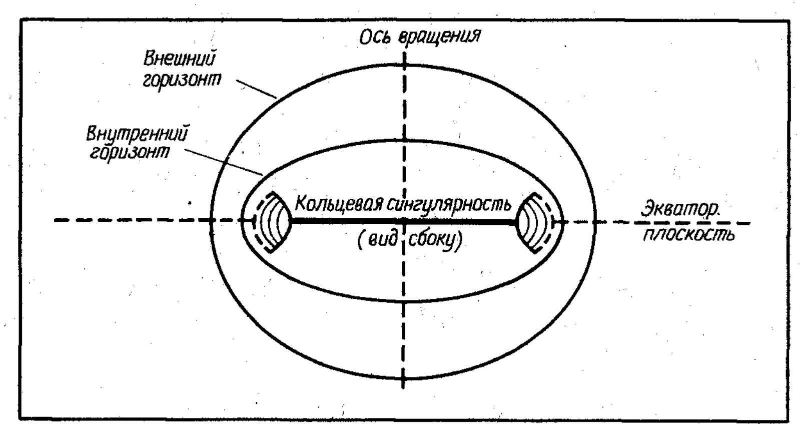


РИС. 12.9.

Разброс круговых орбит света внутри быстро вращающейся черной дыры. Под внутренним горизонтом событий существует область, в которой притяжение гравитационного поля уравновешено гравитационным отталкиванием сингулярности. В этой области могут существовать как устойчивые, так и неустойчивые круговые орбиты. (Схема построена для случая $a = 90\%M$.)

щие по оси вращения или очень близко к ней, пройдут сквозь кольцо в отрицательное пространство. Значит, чтобы изобразить траектории таких лучей света полностью, следует включить в схему и отрицательное пространство. Лучи света на рис. 12.5 и 12.8 вообще не проходят сквозь сингулярность и потому всегда остаются в положительном пространстве – их расстояние от сингулярности всегда выражается положительными числами. Однако, как только объект вошел в отрицательное пространство, его расстояние от сингулярности становится отрицательным числом. Эта трудность преодолена на рис. 12.10 очень просто: верхняя половина схемы представляет положительное пространство, а нижняя половина – отрицательное. Поэтому на рис. 12.10 свет, идущий по оси вращения или очень близко от нее, прямо проходит из положительного пространства сквозь центр кольца в отрицательное пространство.

Рассматривая прохождение лучей света сквозь сингулярность, отметим прежде всего, что лучи отклоняются *в сторону* от краев кольца. Это опять-таки связано с гравитационным отталкиванием вблизи сингулярности. Однако нас ждет одна неожиданность. На рис. 12.10 показан луч света, проходящий сквозь сингулярность и прыгающий взад и вперед по дуге эллипса в отрицательном пространстве. Вспомним еще, что эллипс – это кривая, находящаяся на постоянном расстоянии от сингулярности (см. рис. 12.2, где изображены сплющенные эллипсоидальные координаты). Таким образом, этот луч света сохраняет в отрицательном пространстве постоянное расстояние от сингулярности. Значит, он движется по круговой орбите! А так как он прыгает взад и вперед, то его траектория называется *маятниковой круговой орбитой*. Типичная маятниковая круговая орбита в отрицательном пространстве схематически изображена на рис. 12.11.

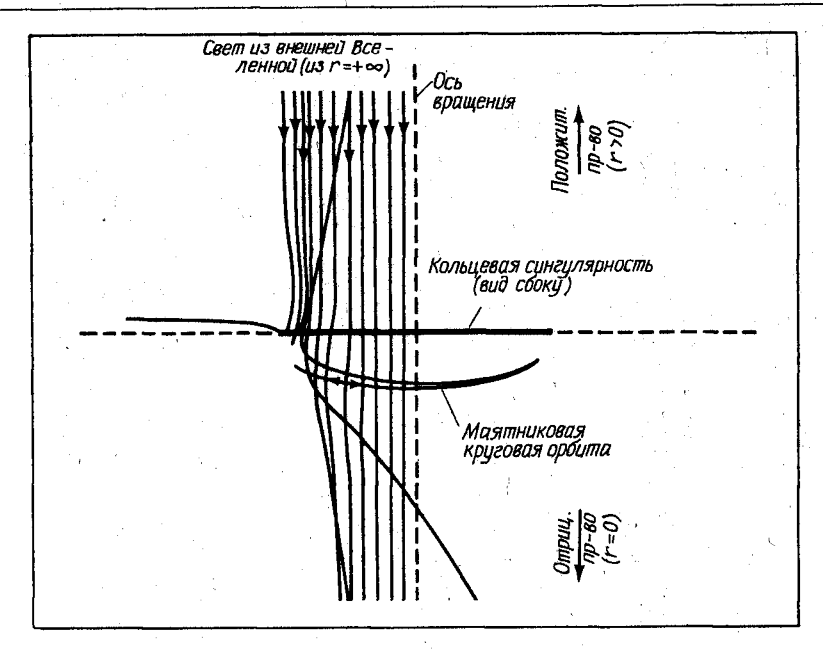


РИС. 12.10.

Траектории света сквозь кольцевую сингулярность. В верхней половине этой схемы изображено положительное пространство (откуда приходят эти лучи света), а в нижней половине – отрицательное пространство (куда эти лучи уходят). Лучи света отклоняются в сторону от кольцевой сингулярности благодаря гравитационному отталкиванию вблизи нее. Некоторые лучи света могут попасть на круговые орбиты в отрицательном пространстве. (Схема построена для предельного решения Керра, когда $M = a$.)

Хотя на рис. 12.10 показан только один луч света, захваченный на маятниковую круговую орбиту, существует целый диапазон значений прицельного параметра для лучей света, почти параллельных оси вращения, при которых они захватываются на подобные удивительные орбиты. В результате в отрицательном пространстве существует ряд маятниковых круговых орбит. На рис. 12.12 изображены границы всех возможных маятниковых круговых орбит для быстро вращающейся черной дыры. Заметим, что все изображенное на рис. 12.12 полностью находится в отрицательном пространстве, а соответствующие ему рис. 12.7 и 12.9 – полностью в положительном пространстве. Все маятниковые круговые орбиты неустойчивы.

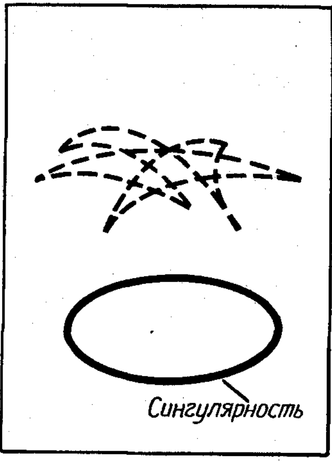


РИС. 12.11.

Маятниковые круговые орбиты в отрицательном пространстве. Лучи света, которые прошли сквозь сингулярность, имея точно выдержанное значение прицельного параметра, попадают на круговую орбиту вокруг сингулярности в отрицательном пространстве. Эти орбиты называются маятниковыми, так как лучи света отскакивают взад и вперед на поверхности постоянного расстояния (поверхности эллипсоида) от сингулярности. Это расстояние отрицательно.

Чтобы довести до конца наш анализ распространения световых лучей, заметим, что, согласно рис. 12.10, луч, проходящий рядом с внутренним краем кольца, может проникнуть в отрицательное пространство и снова отразиться назад. Тот факт, что луч может на мгновение нырнуть в отрицательное пространство и вернуться оттуда, сыграет важную роль при рассмотрении картины керровской черной дыры, какой она представляется удаленному астроному.

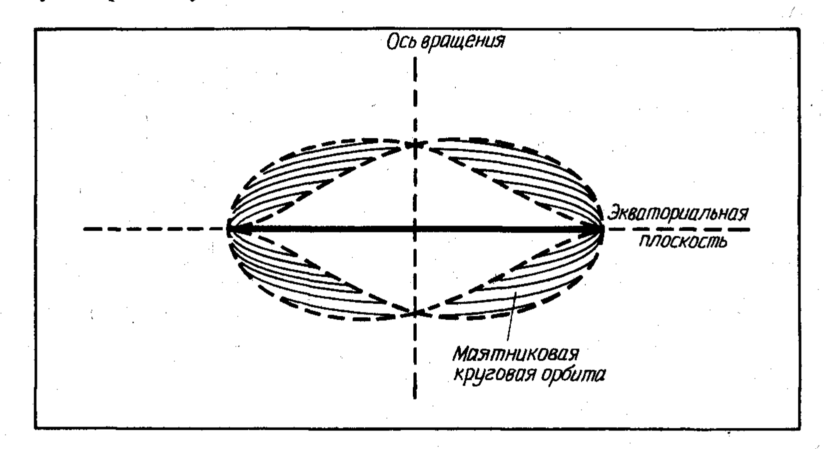


РИС. 12.12.

Разброс маятниковых круговых орбит света в отрицательном пространстве ($r < 0$). Все возможные маятниковые круговые орбиты вблизи сингулярности керровской черной дыры (при $a = 90\% M$) лежат внутри границ, показанных на схеме. Внутри этой области отрицательного пространства лучи света отскакивают туда и обратно по эллипсоидальной поверхности.

Наконец, рассмотрим луч света, приходящий к керровской сингулярности со стороны отрицательной Вселенной. Те из них, которые идут по оси вращения или очень близко к ней, непосредственно попадают в положительное пространство сквозь кольцевую сингулярность. Однако, как показано на рис. 12.13, *все* лучи света, обладающие при сближении с черной дырой большими значениями прицельного параметра, *отталкиваются* от нее. При взгляде из отрицательного пространства дыра оказывается источником антигравитации. Она *все* отталкивает от себя и *ничего* не притягивает. Вот почему отрицательная Вселенная иногда называется «миром антигравитации».

Теперь, после того как мы подробно рассмотрели ход различных траекторий лучей света вблизи керровской черной дыры, можно представить себе, как будет выглядеть вращающаяся черная дыра для удаленного астронома или достаточно смелого

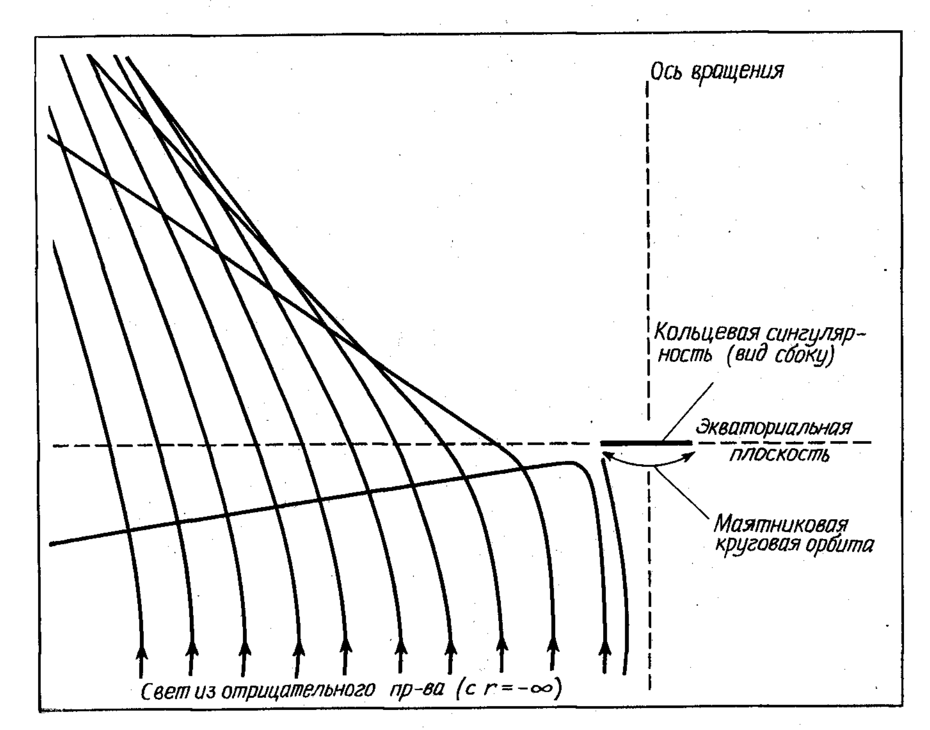


РИС. 12.13.

Лучи света, идущие от отрицательного пространства. Приближающиеся к вращающейся черной дыре из отрицательного пространства лучи света отталкиваются этой дырой. В отрицательном пространстве вращающаяся черная дыра является источником антигравитации. (Схема построена для предельного решения Керра, когда $M = a$.)

космонавта. Представим себе сначала астронома в нашей Все- ленной, наблюдающего керровскую черную дыру. Поскольку ды- ра обладает осевой симметрией, астроном будет наблюдать раз- ные картины в зависимости от того, под каким углом к оси вращения дыры он наблюдает. Для удобства на рис. 12.14 введе *азимутальный угол* θ. При θ = 0 удаленный астроном смотри прямо вдоль оси вращения дыры, а при θ = 90° – вдоль ее эква- ториальной плоскости.

Пусть наш астроном излучает центр вращающейся черно дыры с помощью чрезвычайно мощного телескопа. Астроно находится так далеко от дыры, что пространство-время для нег плоское, а телескоп направлен прямо на сингулярность. Н рис. 12.15, выполненном по расчетам Каннингэма, показано, чт увидит астроном под разными углами в случае предельной кер ровской дыры ($M = a$). Глядя вниз по оси вращения (при θ = 0 он видит круговую область, заполненную светом, проходящим из отрицательного пространства через кольцевую сингулярность Если сама сингулярность также излучает свет (а это *действи- тельно* так; причины будут обсуждены в одной из следующи глав), то ее излучение выглядит как кольцо, окружающее кру света, идущего из отрицательного пространства. Между круго света из отрицательного пространства и световым кольцом о сингулярности находится область, в которой распространяетс свет из положительного пространства – тот самый, который сна чала нырнул в отрицательное пространство, а потом снова вы нырнул оттуда. Свет из предыдущей Вселенной прошлого (в по ложительном пространстве), пришедший к дыре рядо с внутренним краем кольцевой сингулярности, подвергается дей ствию сильного антигравитационного поля. Поэтому такой све отталкивается сингулярностью и снова выбрасывается в положи тельное пространство нашей Вселенной. Снова необходимо под черкнуть, что говорить о выходе света из керровской черной ды ры можно потому, что мы рассматриваем здесь сильн идеализированный теоретический случай. В такое полное реше ние Керра фактически входят как черная, так и белая дыра

Если смотреть на дыру под углом к оси ее вращения, то кру жок света из отрицательной Вселенной становится эллиптичес ким и уменьшается в размерах. При еще бо́льших углах област заключающая в себе свет из отрицательной Вселенной, умень шается и вытягивается еще сильнее. К тому же и светящийс образ сингулярности становится все более вытянутым эллипсо по мере того, как мы смотрим на керровскую сингулярность вс более и более в профиль. Как и прежде, область между светом и отрицательного пространства и от сингулярности заполнена лу чами из положительного пространства, которые ненадолго ныр нули в отрицательную Вселенную и вернулись назад.

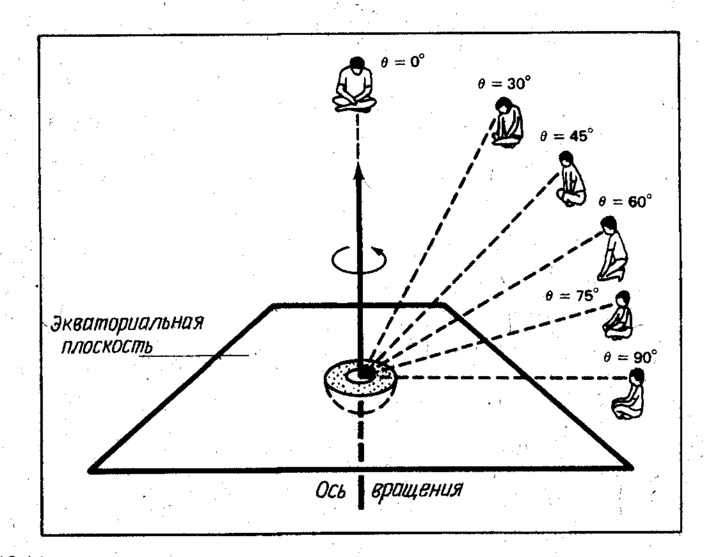


РИС. 12.14.
Азимутальный угол θ. Если рассматривать керровскую черную дыру под разными углами, она будет выглядеть различно. Для указания, с какого направления рассматривается черная дыра, удобно пользоваться азимутальным углом θ.

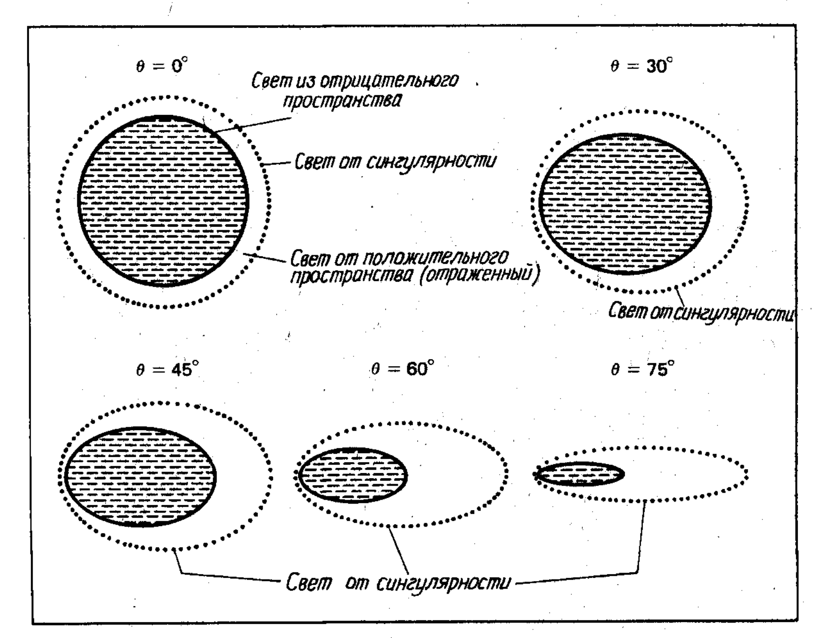


РИС. 12.15.
Как выглядит сингулярность. На этой последовательности схем показано, как выглядит сингулярность предельной керровской черной дыры ($M = a$) под разными углами. Свет из отрицательного пространства проникает сквозь центр кольцевой сингулярности (изображен пунктирной линией).

Описанный только что анализ касался лишь вида самой сингулярности. Если наблюдающий черную дыру астроном сменит окуляр своего телескопа на широкоугольный, то он сможет увидеть и области на больших расстояниях от сингулярности. Чтобы разобраться в такой цельной картине вращающейся черной дыры, необходимо обратиться к диаграммам Пенроуза.

Рассмотрим диаграмму Пенроуза для предельной керровской дыры ($M = a$), изображенную на рис. 12.16. Вспомним, что на всех таких пространственно-временных диаграммах лучи света всегда направлены под углом 45°. На данной диаграмме Пенроуза изображены мировые линии характерных лучей света, которые может увидеть астроном в нашей Вселенной (Вселенная 3). Прежде всего он получает свет от $\mathscr{I}^-$ из отрицательной Вселенной (Вселенная 2). Этот свет приходит от самого центра кольцевой сингулярности. Астроном получает также свет от сингулярности, ограничивающей Вселенную 2 и тем самым разделяющий положительное пространство (справа) и отрицательное пространство (слева). Вид световой области из Вселенной 2 и от сингулярности показан на рис. 12.15. Однако с наружной границы света, приходящего от сингулярности, астроном видит световые лучи, идущие еще от двух источников.

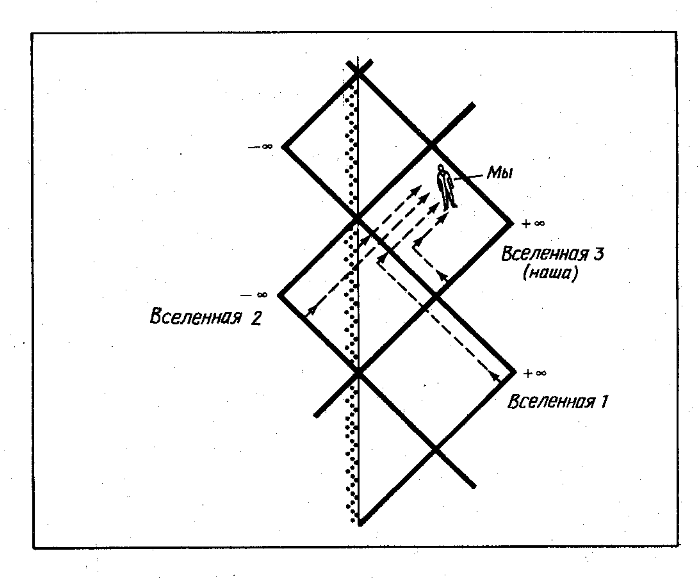


РИС. 12.16.
Диаграмма Пенроуза для предельной керровской черной дыры ($M = a$). Астроном в нашей Вселенной видит свет, приходящий из разных мест, при наблюдении вращающейся черной дыры. К астроному в нашей Вселенной (Вселенная 3) приходит свет из отрицательного пространства (Вселенная 2) и связанной с этим пространством сингулярности. К астроному также отражается изнутри дыры свет из предыдущей Вселенной (Вселенная 1) и из ранних эпох нашей Вселенной.

Звезды и галактики в нашей Вселенной (а также наверняка и в других Вселенных) испускают свет во всех направлениях. Часть этого света попадает на вращающуюся черную дыру. Когда этот свет проходит в эргосферу дыры, он многократно прокручивается вокруг оси вращения. Грубо говоря, часть этого света испытывает действие «центробежных сил», отбрасывающих лучи назад во Вселенную. Иными словами, луч света из $\mathscr{I}^-$ нашей Вселенной и $\mathscr{I}^-$ предыдущей Вселенной (Вселенной 1) могут снова отражаться в положительное пространство. Удаленный астроном может поэтому видеть свет из Вселенной 1 и из нашей Вселенной (от ранних этапов ее истории!).

На рис. 12.17,*А*–*В*, изображен полный вид предельной керровской черной дыры, как ее видел бы удаленный астроном в нашей Вселенной. Во всех случаях характерный вид сингулярности взят с рис. 12.15. Центральная часть дыры всякий раз окружена большой круговой областью, заполненной светом из Вселенной 1. Этот свет отражается в сторону астронома из глубокой внутренней части дыры. Вне этой круговой области астроном видит свет от объектов из его собственной Вселенной. Таким образом, астроном, рассматривая вращающуюся черную дыру, может наблюдать, что происходит в отрицательной Вселенной и что происходило в предшествующей положительной Вселенной. К тому же свет из Вселенной 3, наблюдаемый рядом с дырой, приходит от раннего этапа нашей собственной Вселенной (из $\mathscr{I}^-$ Вселенной 3). Поэтому астроном в принципе должен увидеть, что происходило миллиарды лет назад! У него появляется принципиальная возможность увидеть образование Земли, динозавров или доисторического человека – все зависит от того, куда именно он будет смотреть.

Общая картина черной дыры при наблюдении под разными углами имеет одни и те же особенности. Однако при наблюдении под углом к ее оси вращения видимое положение сингулярности оказывается сдвинутым в одну сторону ввиду вращения дыры. Когда астроном наблюдает дыру в ее экваториальной плоскости ($\theta = 90°$), он видит сингулярность сбоку. В отличие от предыдущих случаев свет, обращающийся вокруг сингулярности в экваториальной плоскости, может «раскрутиться» наружу и попасть в телескоп далекого астронома.

Если черная дыра вращается медленнее, чем с предельной скоростью, то вид ее при наблюдении с направлений вне экваториальной плоскости в основном такой же, как у предельной керровской дыры. Однако при взгляде из экваториальной плоскости ($\theta = 90°$) обнаруживаются некоторые новые детали. Чтобы понять их происхождение, следует обратить внимание на соответ-

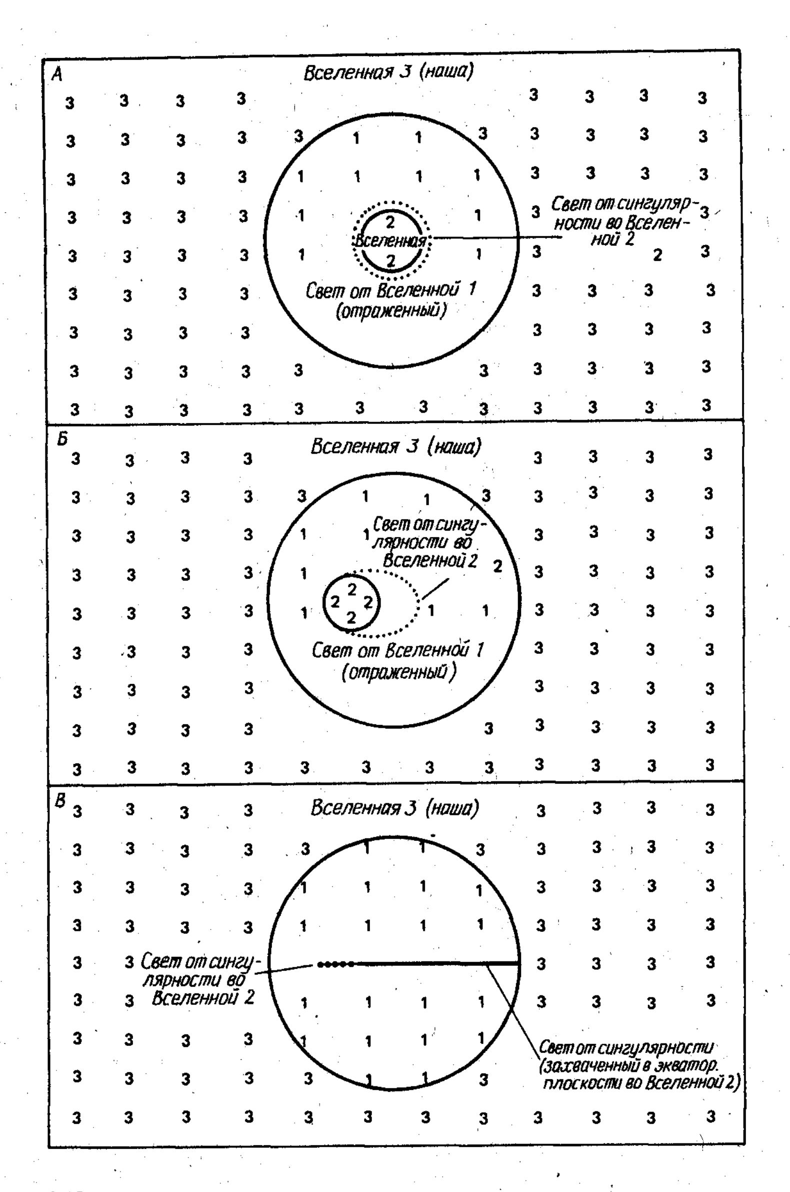


РИС. 12.17.

А: Вид предельной керровской черной дыры ($M = a$) *при* $\theta = 0°$. При наблюдении прямо по оси вращения удаленный астроном видит свет из Вселенной с отрицательным пространством и из предыдущей Вселенной с положительным пространством. Он видит свет также из самых ранних эпох своей собственной Вселенной.

Б: Вид предельной керровской черной дыры ($M = a$) *при* $\theta = 45°$. Если направление наблюдения характеризуется промежуточным значением угла между осью вращения и экваториальной плоскостью, то вид черной дыры в основном остается тем же, что на рис. 12.17,*А*. Но, поскольку дыра вращается, сингулярность будет казаться сдвинутой с центра поля зрения.

В: Вид предельной керровской черной дыры ($M = a$) *при* $\theta = 90°$. При взгляде из экваториальной плоскости астроном видит сингулярность «в профиль». Свет, обращающийся вокруг сингулярности в экваториальной плоскости, может уходить от дыры по спирали к удаленному астроному.

ствующую диаграмму Пенроуза. На рис. 12.18 изображена диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры при $M > a$.

В нашей Вселенной (Вселенная 3) астроном все еще наблюдает свет, приходящий как непосредственно из Вселенной 2, так и с ограничивающей ее сингулярности. К нему продолжает поступать и отраженный свет из Вселенной 1 (предшествующей Вселенной с положительным пространством) и из отдаленного прошлого его собственной Вселенной. Однако, поскольку дыра вращается медленно, на диаграмме Пенроуза появляется еще одна Вселенная с отрицательным пространством. Свет от сингулярности, ограничивающей эту добавочную отрицательную Вселенную (Вселенную 2А), также отражается изнутри дыры в сторону удаленного астронома. Таким образом, последний может видеть свет с сингулярности Вселенной 2А. Соответствующие лучи попадают к удаленному астроному лишь в том случае, если он находится в экваториальной плоскости черной дыры ($\theta = 90°$). На рис. 12.19, основанном на расчетах Каннингэма, показан вид почти-предельной керровской черной дыры ($a = 10\% M$). Вид этот почти такой же, как и в предельном случае (рис. 12.17,*В*), однако теперь виден свет от сингулярности, ограничивающей вторую отрицательную Вселенную. Свет от этой второй сингулярности появляется несколько левее в поле зрения и включает два небольших «крыла», слегка поднимающихся и опускающихся относительно экваториальной плоскости.

На очереди – занимательное упражнение, героями которого будут отчаянные космонавты: что они увидят, ныряя во вращающуюся керровскую черную дыру и выныривая из нее? Рассмотрим сначала *полет «камикадзе»*. Два космонавта покидают нашу Вселенную и ныряют в непредельную керровскую черную дыру в ее экваториальной плоскости. Направив свой космический корабль в экваториальной плоскости дыры, они понимают, что врежутся в сингулярность и будут разорваны бесконечно сильно искривленным пространством-временем. И все же они решаются...

На рис. 12.20 приведена мировая линия этих космонавтов-самоубийц. Они направляются прямо к сингулярности в экваториальной плоскости. Согласно обозначениям, использованным в предыдущем случае, они начинают путешествие в нашей Вселенной (Вселенной 3). Как и астроном, наблюдающий черную

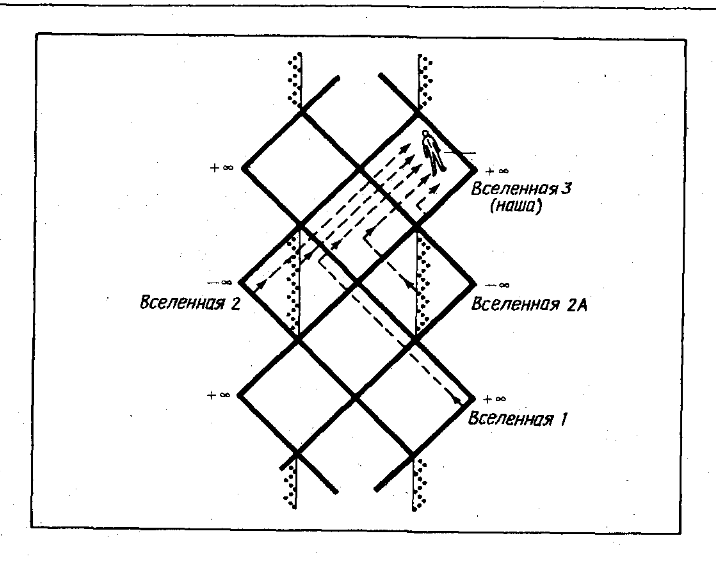


РИС. 12.18.

Диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры с $M > a$. Если черная дыра вращается со скоростью меньше предельной, то свет от сингулярности, которая ограничивает вторую отрицательную Вселенную (Вселенную 2А), отражается изнутри черной дыры к удаленному астроному в нашей Вселенной.

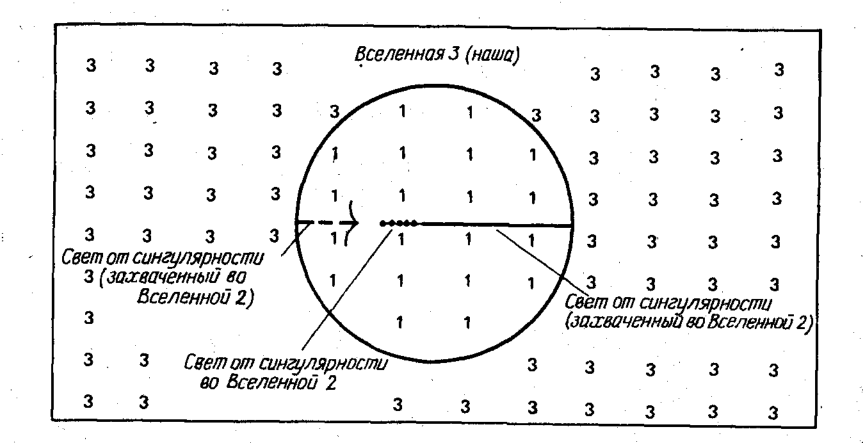


РИС. 12.19.

Вид почти-предельной керровской черной дыры при $\theta = 90°$. При наблюдении из экваториальной плоскости непредельной ($M > a$) вращающейся черной дыры астроном может видеть свет из второй отрицательной Вселенной (Вселенной 2А), отраженный к нему изнутри дыры.

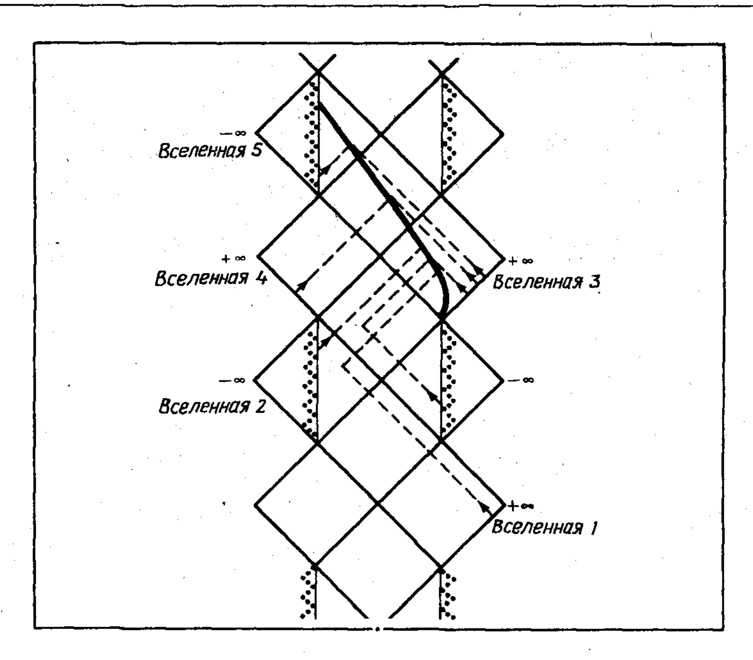


РИС. 12.20.

Полет «камикадзе». Здесь на диаграмме Пенроуза изображена мировая линия двух космонавтов, гибнущих в черной дыре. Космонавты ведут свой космический корабль в экваториальной плоскости непредельной керровской черной дыры ($M > a$).

дыру, космонавты могут видеть свет из Вселенной 2, Вселенной 2А и Вселенной 1. Кроме того, после пересечения внешнего горизонта событий они могут видеть Вселенную 4 – Вселенную с положительным пространством, находящуюся на диаграмме Пенроуза напротив нашей Вселенной. Наконец, после пересечения внутреннего горизонта событий они увидят и Вселенную 5 – ту Вселенную с отрицательным пространством, которую ограничивает роковая для них сингулярность. На рис. 12.20 изображены эти различные Вселенные и мировые линии, по которым распространяются характерные лучи света.

Для своего путешествия космонавты сконструировали специальный корабль. Их космический корабль снабжен двумя большими иллюминаторами (рис. 12.21). В каждый из них видно в точности половину небесной сферы. При конструировании корабля космонавты учли один важный факт: при вхождении в эргосферу эффект увлечения инерциальных систем должен вызвать быстрое вращение корабля. Для избежания этой помехи предусмотрены стабилизирующие ракетные двигатели, которые обеспечивают ориентацию носового иллюминатора всегда в сторону

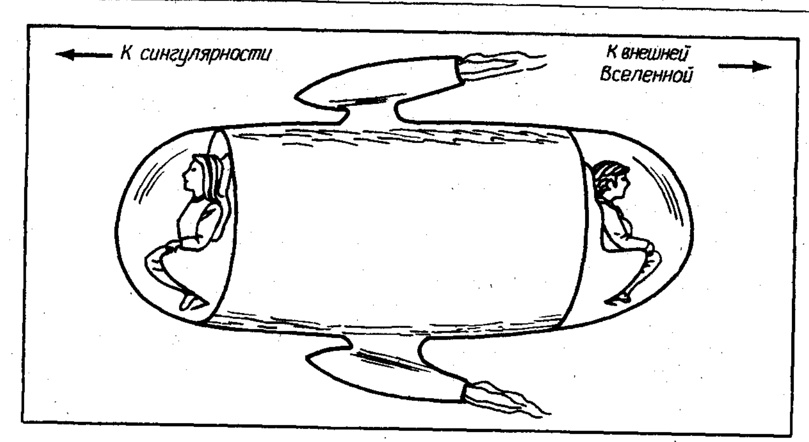


РИС. 12.21.
Космический корабль, увлекающий космонавтов в дыру. Через каждый из двух иллюминаторов корабля видно в точности половину небесной сферы. Космический корабль оснащен стабилизирующими ракетными двигателями, чтобы носовой иллюминатор был всегда направлен на сингулярность, а кормовой – в прямо противоположную сторону.

сингулярности, а кормового – всегда в сторону внешней Вселенной.

В течение полета космонавты делают парные фотоснимки, один из которых всегда запечатлевает вид вперед, а другой – вид назад, на разных характерных этапах падения космонавтов в дыру. На диаграмме Пенроуза (рис. 12.22) на мировой линии космонавтов отмечены точки, показывающие, где сделана каждая из семи пар фотографий.

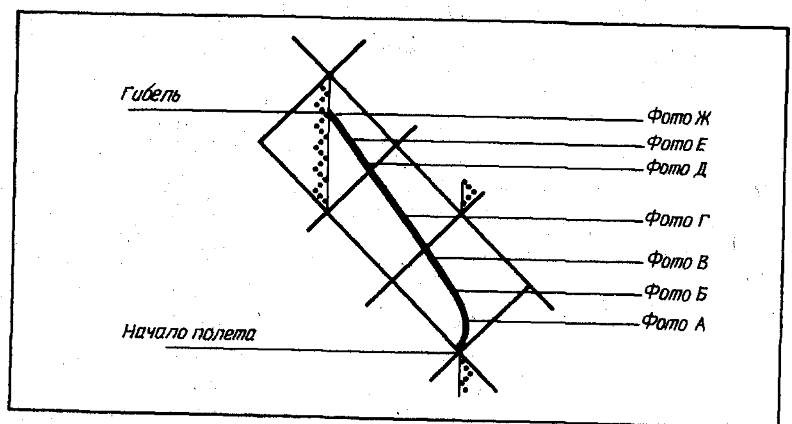


РИС. 12.22.
Точки, в которых производилось фотографирование. Космонавты делали по паре снимков (один из носового, другой – из кормового иллюминатора) в семи точках при своем спуске в дыру.

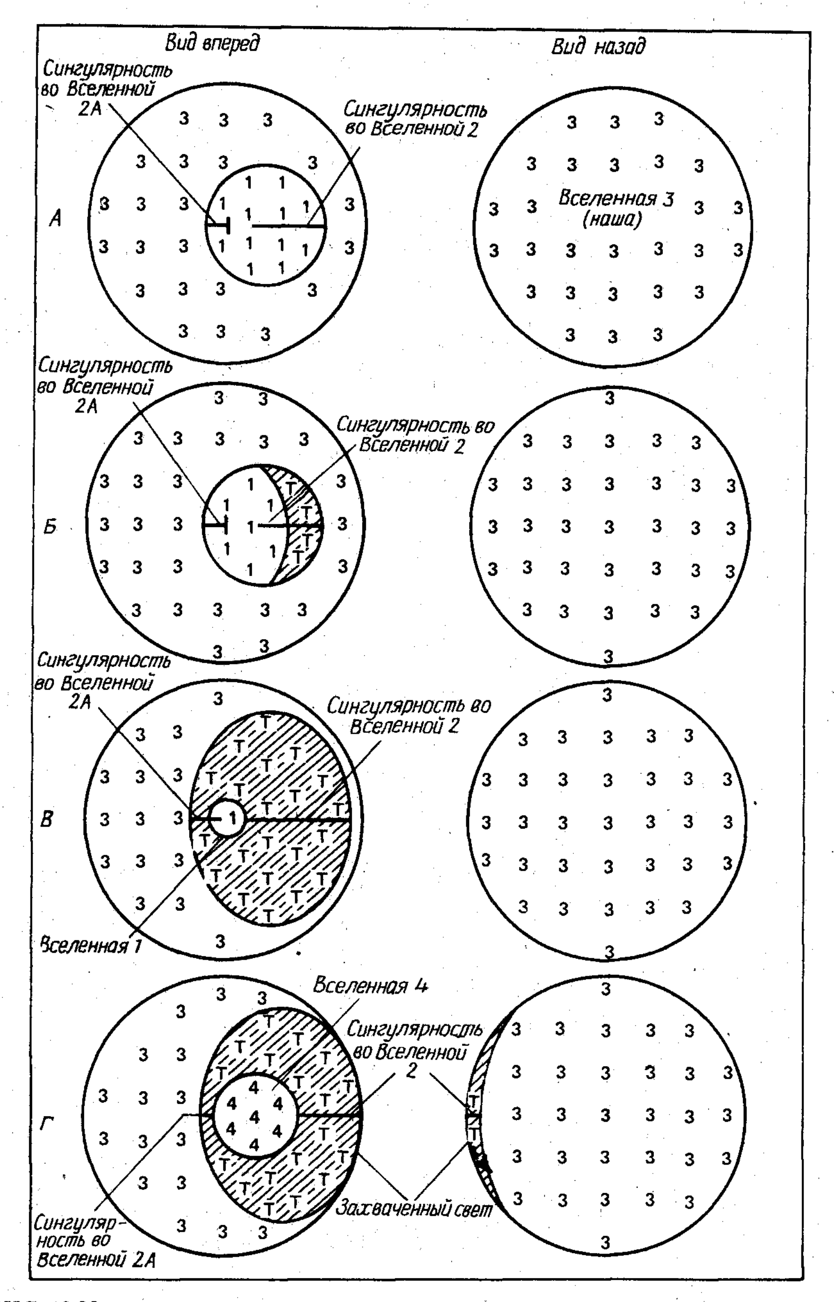
Астронавты погрузились в свой космический корабль и взлетели. Еще будучи очень далеко от черной дыры, они сделали первую пару снимков (рис. 12.23,*А*). Поскольку пространство-время вокруг них было почти плоским, вид впереди очень похож на тот, который наблюдал астроном, спокойно устроившийся на Земле (ср. с рис. 12.19,*А*). Вид из кормового иллюминатора особого интереса не представляет: просто видно, откуда летят космонавты.

Приближаясь к черной дыре, космонавты входят в область круговых орбит света. Здесь они наблюдают свет, захваченный гравитационным полем дыры. На второй паре снимков (рис. 12.23,*Б*) этот захваченный свет занимает часть поля зрения (он обозначен значком Т). Через кормовой иллюминатор видна только наша Вселенная, хотя сам вид звезд и галактик теперь начал понемногу искажаться.

По мере того как падающий в дыру корабль приближается к внешнему горизонту событий, часть поля зрения, занятая захваченным светом, все возрастает. При этом космонавты постепенно удаляются от Вселенной 1. Та часть поля зрения, которая занята изображением Вселенной 1, постепенно уменьшается, что видно на паре снимков, сделанных непосредственно над внешним горизонтом событий (рис. 12.23,*В*). В тот момент, когда корабль проходит через внешний горизонт событий, Вселенная 1 вообще исчезает из виду. По пути к внешнему горизонту событий через кормовой иллюминатор была все время видна только Вселенная 3. Но по мере того, как космонавты приближаются к черной дыре, изображения звезд и галактик нашей Вселенной искажаются все сильнее и сильнее.

Что происходит после того, как космонавты опустились под внешний горизонт событий, можно понять, возвращаясь к диаграмме Пенроуза на рис. 12.20. Если вспомнить, что мировые линии света идут под углом 45°, то ясно, что после прохождения через внешний горизонт событий корабль уже становится недостижим для света из Вселенной 1. Вместе с тем отметим, что между внешним и внутренним горизонтами событий космонавты могут непосредственно видеть свет из Вселенной 4. Поэтому на снимках, сделанных в промежутке между двумя горизонтами, запечатлен свет звезд и галактик из Вселенной 4 (рис. 12.23,*Г*). Кроме того, эффект увлечения инерциальных систем стал здесь настолько сильным, что часть захваченного света видна уже из кормового иллюминатора.

После падения сквозь внутренний горизонт событий космонавты еще могут видеть свет из Вселенной 4. Он отражается изнутри черной дыры точно так же, как отражался свет из Вселен-



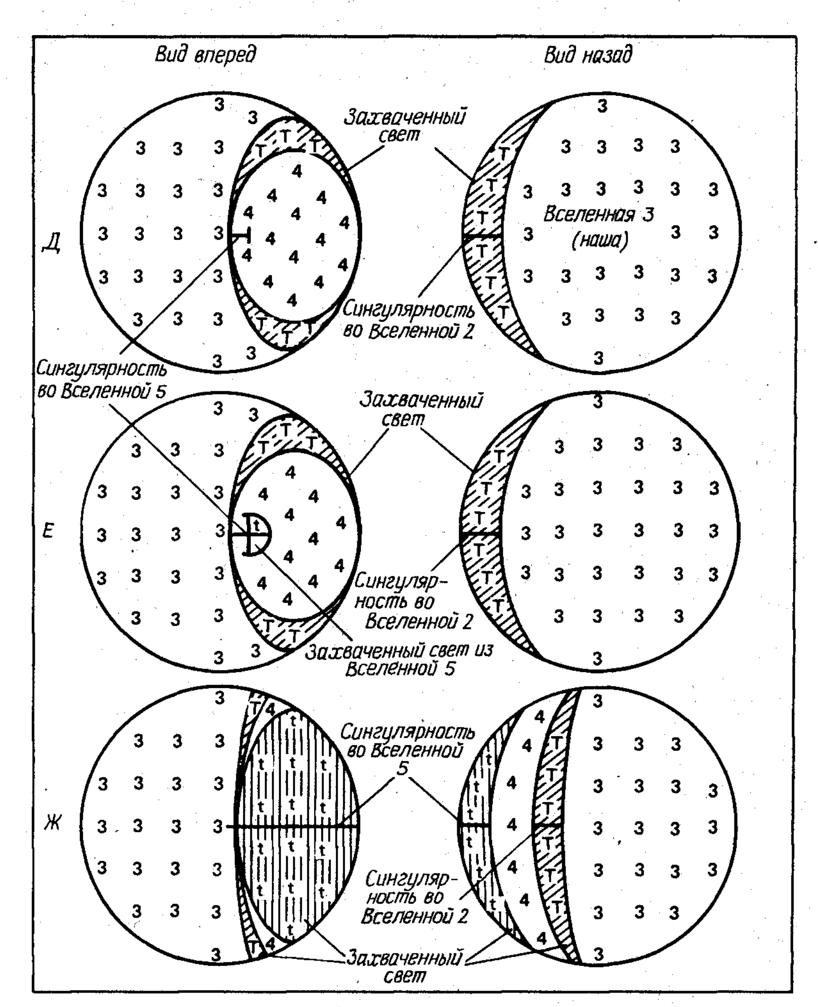


РИС. 12.23.

А: Вдали от черной дыры. Если смотреть издали на черную дыру, то вид в носовой иллюминатор такой же, как и наблюдаемый удаленным астрономом. В кормовой иллюминатор просто видна наша Вселенная.

Б: Внутри границ круговых орбит света. Оказавшись внутри границ круговых орбит света, космонавты наблюдают лучи, захваченные гравитационным полем черной дыры. Из кормового иллюминатора все еще видна только наша Вселенная, хотя вид объектов уже начинает искажаться.

В: Прямо над внешним горизонтом событий. По мере приближения космонавтов к внешнему горизонту событий, та область, которую занимает захваченный свет, растет, а область света из Вселенной 1 сокращается. Хотя через кормовой иллюминатор видна только наша Вселенная, вид ее сильно искажен.

Г: Между внешним и внутренним горизонтами событий. Спустившись под внешний горизонт событий, космонавты начинают видеть свет из Вселенной 4. Кроме того, в поле зрения кормового иллюминатора добавляется некоторое количество захваченного света за счет эффекта увлечения.

Д: Сразу под внутренним горизонтом событий. Немедленно после погружения под внутренний горизонт событий в поле зрения космонавтов появляется сингулярность во Вселенной 5. Видна большая область, заполненная отраженным светом из Вселенной 4, а в поле зрения кормового иллюминатора она заполняется еще бо́льшим количеством увлеченного света.

Е: Между внутренним горизонтом событий и сингулярностью. Ниже внутреннего горизонта событий становится видна новая область, содержащая свет, захваченный вблизи сингулярности. Эта вторая область захваченного света может наблюдаться только при полете, заканчивающемся гибелью космонавтов.

Ж: Непосредственно над сингулярностью. Прямо перед тем как космонавты попадут в сингулярность, новая область захваченного света вырастает настолько, что появляется и в поле зрения кормового иллюминатора. Представленная здесь картина – последнее, что увидят космонавты перед гибелью.

ной 1. Сразу под внутренним горизонтом событий (рис. 12.23,*Д*) можно наблюдать сингулярность, ограничивающую Вселенную 5. Это та самая сингулярность, в которую обречены врезаться наши космонавты. Отметим также, что сингулярность, ограничивающая Вселенную 2А, теперь пропадает из виду, а в кормовом иллюминаторе видно все больше захваченного света.

Продолжая падать, космонавты видят, как увеличивается изображение сингулярности во Вселенной 5. Они должны при этом заметить, что сингулярность окружена новой областью захваченного света, который на последующих снимках обозначен как t (рис. 12.23,*Е*). К тому же свет из Вселенной 3 теперь доходит до космонавтов по двум каналам. Они видят свет, непосредственно приходящий из нашей Вселенной (главным образом через кормовой иллюминатор), но тот же свет приходит к ним и косвенно, отразившись от сингулярности во Вселенной 5.

Наконец, непосредственно перед тем, как космонавты будут разорваны на части в сингулярности, вторая область захваченного света разрастется настолько, что перетянется и в поле зрения кормового иллюминатора. Эта пара снимков (рис. 12.23,*Ж*) – последнее, что увидят космонавты перед своей гибелью. Отметим также, что и бо́льшая часть отраженного света из Вселенной 4 здесь перетянута в поле зрения кормового иллюминатора.

Узнав о трагическом конце своих коллег, еще два космонавта вдохновились идеей космического путешествия в черную дыру, но наметили себе более безопасный маршрут. Опираясь на тот факт, что керровская сингулярность имеет форму кольца, космонавты решили спуститься в черную дыру вдоль ее оси вращения. По их расчетам это поможет избежать гибели в точке с бесконечной кривизной пространства-времени. Кроме того, космонавты решили *не ставить* на свой космический корабль никаких ракетных двигателей. Их путешествие будет сводиться к *свободному падению* на вращающуюся черную дыру. Тот факт, что космонавты свободно падают на дыру вдоль ее оси вращения, приводит к важным последствиям. При подходе к кольцевой сингулярности их встретит столь сильная антигравитация, что их выбросит прочь из дыры. Прорваться в отрицательную Вселенную по другую сторону кольца они могли бы только при использовании тяги ракетных двигателей. Их путешествие поэтому получило кодовое название «прыжок с отскоком».

На рис. 12.24 показан «прыжок с отскоком» на диаграмме Пенроуза. В тех же обозначениях, что и прежде, можно сказать, что это путешествие началось во Вселенной 3 (нашей Вселенной). Нырнув в черную дыру, космонавты отражаются от сингулярности во Вселенной 5. Их путешествие заканчивается прибытием во Вселенную 7.

Конструкция использованного в этом путешествии космиче-

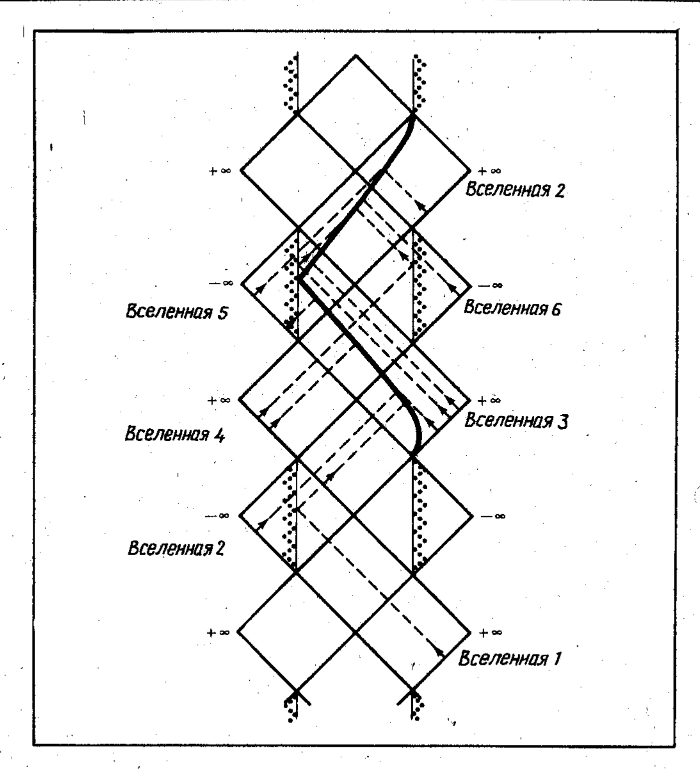
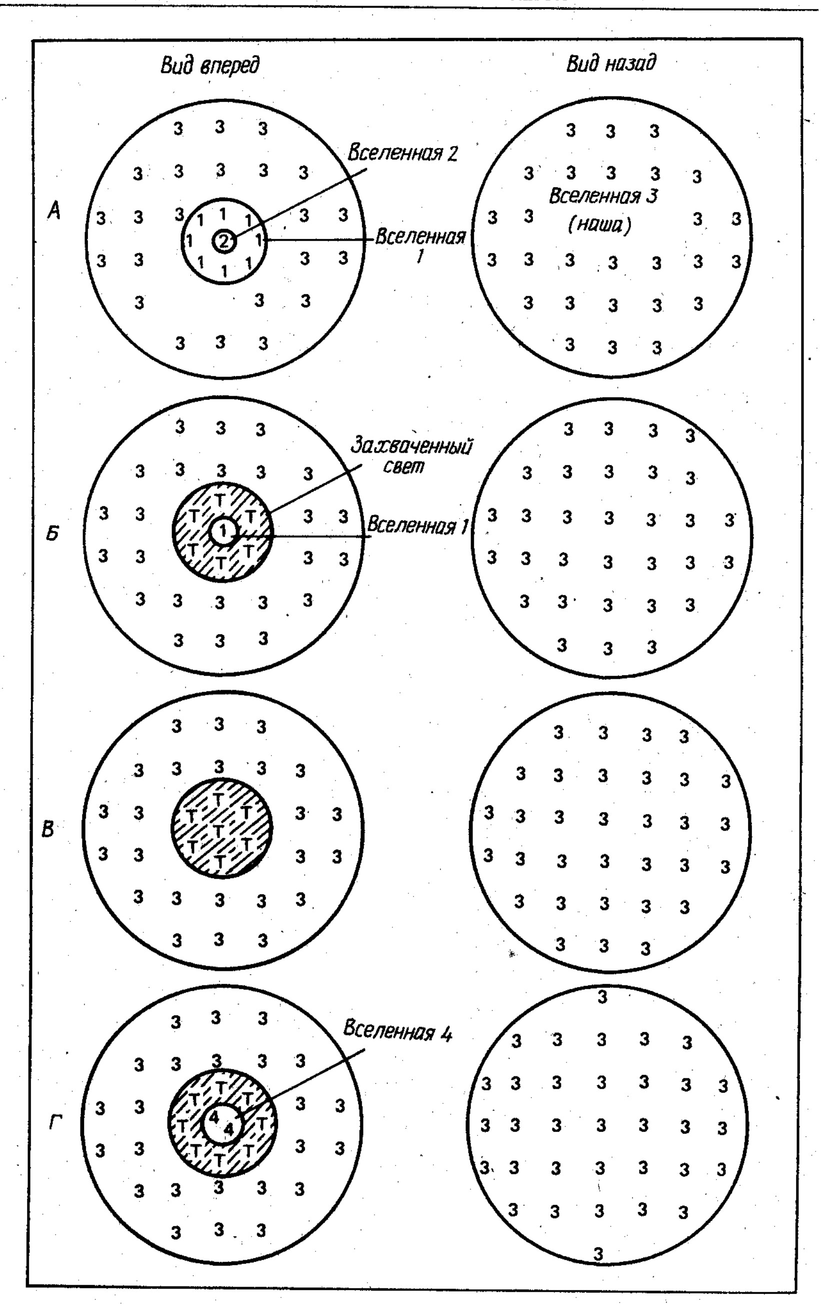


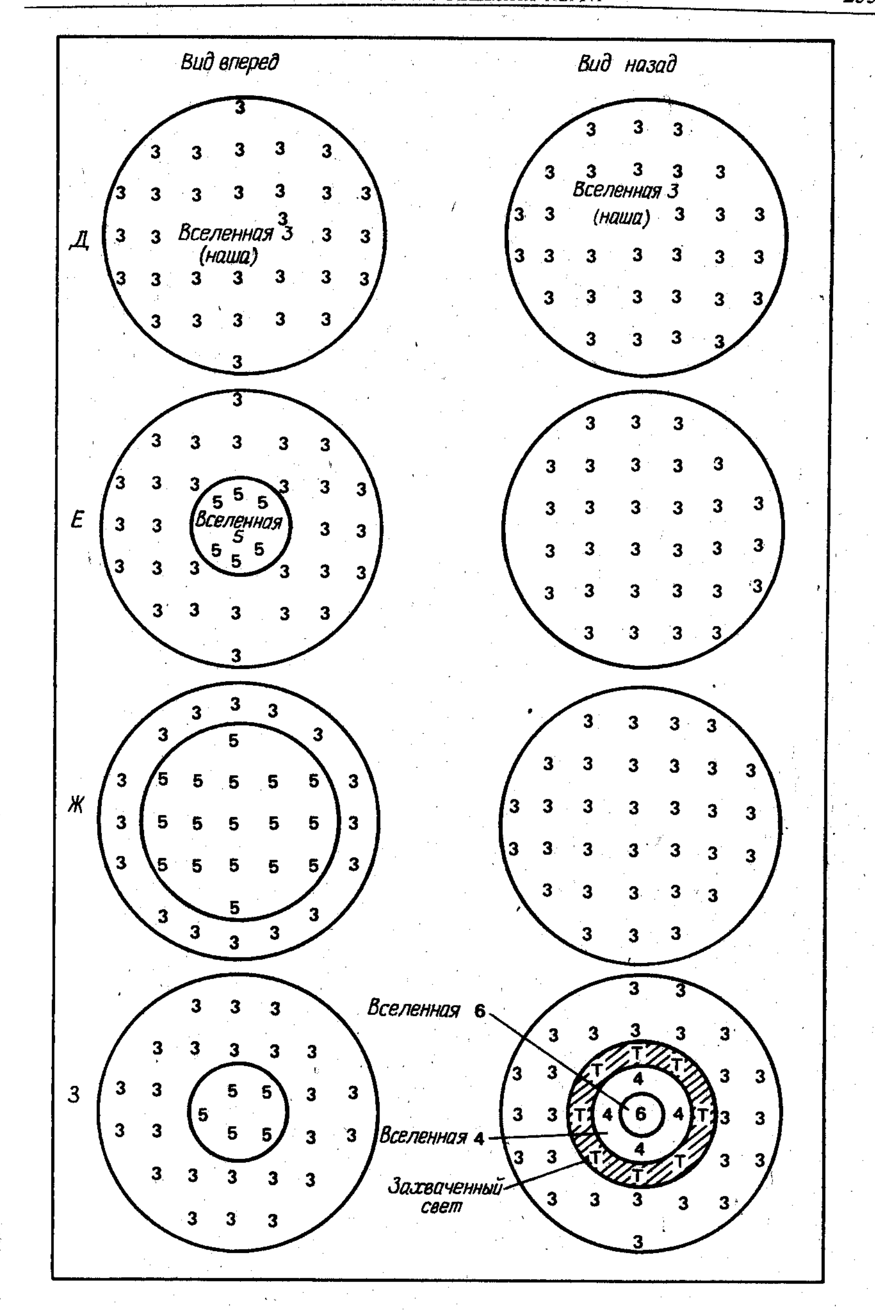
РИС. 12.24.
Путешествие «прыжок с отскоком». На диаграмме Пенроуза изображена мировая линия двух космонавтов. Их космический корабль свободно падает вдоль оси вращения непредельной керровской черной дыры ($M > a$).

ского корабля представлена на рис. 12.25. Заметьте, что у корабля нет ракетных двигателей! Предоставив своему кораблю свободно падать на черную дыру, космонавты обеспечивают его «отскок» наружу под действием антигравитации вблизи кольцевой сингулярности. Космический корабль снабжен двумя большими иллюминаторами, причем из каждого можно наблюдать в точности половину небесной сферы. Космонавты условились называть носовым иллюминатором тот, который *всегда* обращен к сингулярности (как до, *так* и после отскока). Напротив, тот иллюминатор, который все время смотрит во внешнюю Вселенную (до отскока – во Вселенную 3, а после – во Вселенную 7), они именуют кормовым.

Во время полета космонавты сделали 11 пар фотоснимков (от *А* до *Л*), на которых оказались запечатленными изменения вида неба. Как и в случае первого (самоубийственного) путеше-



Вид вперед
Вид назад
А
Б
В
Г
Вселенная 2
Вселенная 1
Вселенная 3 (наша)
Захваченный свет
Вселенная 1
Вселенная 4



Вид вперед
Вид назад
Д
Е
Ж
З
Вселенная 3 (наша)
Вселенная 3 (наша)
Вселенная 5
Вселенная 6
Вселенная 4
Захваченный свет

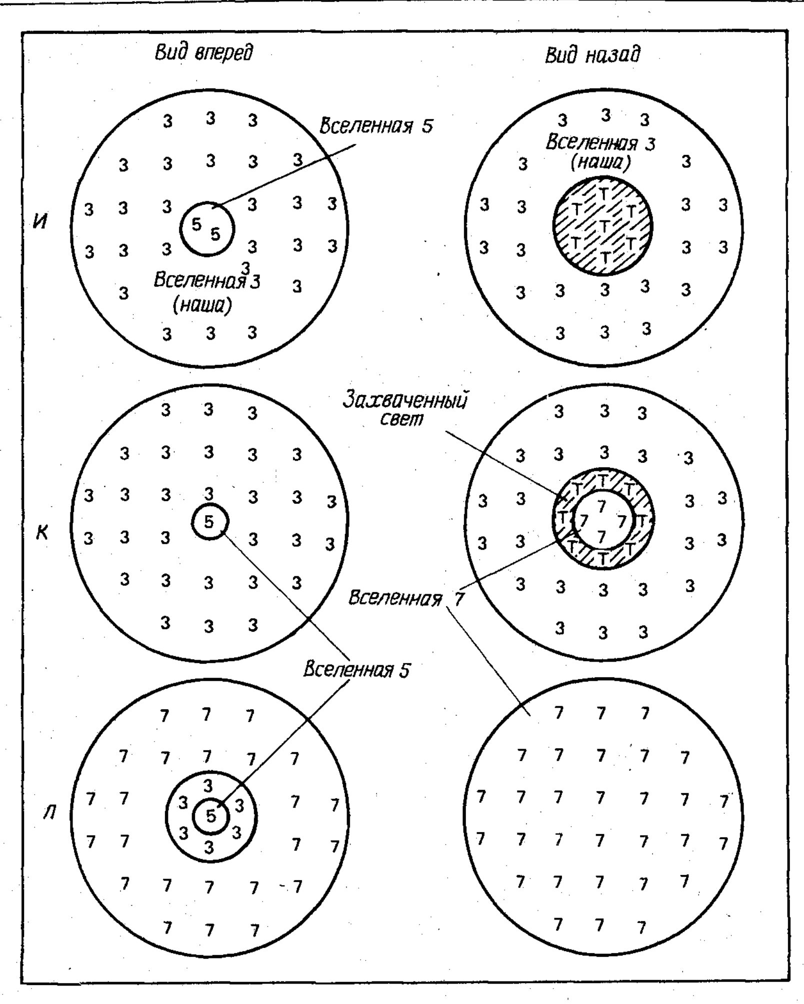


РИС. 12.27.

А: Вдали от черной дыры. Когда корабль находится далеко от черной дыры, картина из носового иллюминатора очень похожа на ту, которую видит удаленный астроном. Из кормового иллюминатора открывается просто вид на нашу Вселенную, из которой прилетели космонавты.

Б: Прямо над внешним горизонтом событий. Когда космонавты приближаются к внешнему горизонту событий, видимые размеры Вселенных 1 и 2 стремительно сокращаются. Из носового иллюминатора космонавты видят также область захваченного света. Вид нашей Вселенной из кормового иллюминатора начинает искажаться.

В: У внешнего горизонта событий. При переходе сквозь внешний горизонт событий Вселенные 1 и 2 полностью исчезают из виду. Средняя часть поля зрения носового иллюминатора заполнена лишь захваченным светом, а картина нашей Вселенной из кормового иллюминатора значительно исказилась.

носовой иллюминатор направлен на сингулярность. Аналогично кормовой иллюминатор *все время* смотрит во внешнюю Вселенную (на пути туда – во Вселенную 3, а на обратном пути – во Вселенную 7). Поэтому пара снимков, сделанных близ момента отскока (рис. 12.27,*Е*), будет правильно отражать картину как непосредственно до, так и сразу после этого момента.

Удаляясь на обратном пути из черной дыры от сингулярности, космонавты видят, как область, занятая светом из Вселенной 5, продолжает увеличиваться в размерах. Из пары снимков, сделанных на внутреннем горизонте событий (рис. 12.27,*Ж*) видно, что Вселенная 5 занимает почти все поле зрения носового иллюминатора, направленного к сингулярности.

Когда космонавты поднимаются сквозь внутренний горизонт событий, они начинают видеть Вселенную 6. Кроме того, к ним попадает и отраженный свет из Вселенной 4. Он отражается от сингулярности, ограничивающей Вселенную 6, что можно выяснить, исследуя мировые линии типичных лучей света на диаграм-

Г: Между внешним и внутренним горизонтами событий. Между двумя горизонтами в середине поля зрения носового иллюминатора можно видеть свет из Вселенной 4. Продолжает усиливаться искажение образов в нашей Вселенной (Вселенной 3).

Д: У внутреннего горизонта событий. Вблизи внутреннего горизонта событий до космонавтов доходит только свет из нашей Вселенной (Вселенной 3). Однако образы звезд и галактик сильнейшим образом искажены.

Е: Вблизи момента отскока. Под внутренним горизонтом событий через иллюминатор, обращенный к сингулярности, можно видеть свет из Вселенной 5. Полностью перемешан свет из прошлого, настоящего и будущего нашей Вселенной (Вселенной 3).

Ж: У внутреннего горизонта событий. При пересечении космонавтами внутреннего горизонта событий на обратном пути из черной дыры бóльшую часть поля зрения носового иллюминатора, обращенного к сингулярности, заполняет свет из Вселенной 5.

З: Между внутренним и внешним горизонтами событий. При удалении корабля от черной дыры после отскока в поле зрения космонавта, смотрящего наружу из (кормового) иллюминатора, появляются Вселенные 6 и 4. Область света из Вселенной 5, наблюдаемая через носовой иллюминатор (направленный внутрь), становится все меньше и меньше.

И: У внешнего горизонта событий. Ни у внешнего горизонта событий, ни выше его до космонавтов не может доходить свет из Вселенных 4 или 6. Изображение Вселенной 5, от которой они удаляются, продолжает уменьшаться в размерах.

К: Прямо над внешним горизонтом событий. Пройдя вверх сквозь внешний горизонт событий, космонавты могут видеть Вселенную 7 в середине кормового (направленного наружу) иллюминатора. Вселенная 5 становится все меньше и меньше.

Л: Далеко от черной дыры. Когда черная дыра осталась далеко позади, Вселенная 7 занимает все поле зрения кормового (направленного наружу) иллюминатора. Вид в сторону черной дыры такой же, какой может наблюдать чужой астроном, обитающий на некой планете во Вселенной 7.

ме Пенроуза (рис. 12.24). Пара снимков, сделанных между двумя горизонтами (рис. 12.27,*З*), показывает также, что космонавты снова видят захваченный свет. И наконец, поскольку они уходят все дальше и дальше от Вселенной 5, ее изображение теперь становится все меньше и меньше.

Исследуя на диаграмме Пенроуза (рис. 12.24) мировые линии типичных лучей света, можно увидеть, что на внешнем горизонте событий до космонавтов не может доходить свет из Вселенной 4 или 6. Поэтому, как только космонавты достигают внешнего горизонта событий, эти две Вселенные пропадают из виду. Как видно на паре снимков, сделанных в этой точке (рис. 12.27,*И*), захваченный свет заполняет середину поля зрения кормового иллюминатора (направленного во внешнюю Вселенную). Отметим также, что Вселенная 5, от которой космонавты удаляются, стала казаться еще меньше.

Вылетев за внешний горизонт событий, космонавты оказываются во Вселенной 7, в которой их путешествие завершается. Поэтому Вселенная 7 появляется в центре поля зрения внешнего (кормового) иллюминатора, как это видно на паре снимков, сделанных сразу над внешним горизонтом событий (рис. 12.27,*К*). По мере того как космонавты удаляются от черной дыры, Вселенная 7 занимает все больше и больше места в иллюминаторе. При этом изображение Вселенной 5 продолжает уменьшаться в размерах, как и изображение нашей Вселенной (Вселенной 3). Поэтому на очень большом расстоянии от черной дыры Вселенная 7 заполняет полностью весь внешний (кормовой) иллюминатор. Свет из Вселенных 3 и 5 сохраняется лишь в крохотном кружке в центре внутреннего (носового) иллюминатора. На паре снимков, сделанных в конце путешествия (рис. 12.27,*Л*), будет наблюдаться та же картина, которую видит «чужой» астроном, живущий во Вселенной 7.

В заключение необходимо отметить, что приведенные здесь пары снимков, сделанных как космонавтами-смертниками, так и участниками «прыжка с отскоком», неполно характеризуют картину полетов. Чтобы не усложнять чрезмерно эти схемы, мы даже не пытались изобразить те многообразные и сложные искажения вида звезд и галактик, которые должны были наблюдать космонавты. Кроме того, мы не стали характеризовать и те разнообразные и сложные явления красного и фиолетового смещения, с которыми при этом столкнулись бы космонавты. Однако в одной из следующих глав мы увидим, что существование на горизонтах событий весьма сильного фиолетового смещения света влечет за собой важные и глубокие последствия.

13 НАБЛЮДЕНИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР

Реальная возможность открытия черных дыр в космосе представляется на первый взгляд безнадежной. Из черной дыры не может вырваться ничто – даже свет! Поэтому нелепо было бы предполагать, чтобы астрономы когда-нибудь смогли заметить в свои телескопы на небе черную дыру.

Из черной дыры ничто не может никогда вырваться, ибо ее гравитационное поле очень сильно. Однако именно посредством своего поля черная дыра могла бы оказывать заметное влияние на движение соседних тел. Значит, не исключено, что черную дыру удастся обнаружить по необычному поведению видимых объектов, движущихся в ее окрестности. Тогда речь шла бы о *косвенном* открытии черной дыры, а следовательно, пришлось бы приложить значительные усилия, чтобы исключить возможность истолкования данных наблюдений без привлечения идеи о черной дыре.

Значительную долю всех звезд, которые наблюдаются на небе, составляют в действительности *двойные звезды*. Как упоминалось в гл. 6, двойная звезда – это на самом деле две звезды, вращающиеся около их общего центра масс, как, например, обращаются около друг друга Земля и Луна.

Астрономы выясняют разными способами, не является ли данная звезда двойной. Во-первых, многолетние наблюдения могут показать, что две видимых по отдельности звезды медленно движутся по небу вокруг друг друга. Такие звезды называются *визуально-двойными*. Во-вторых, астроном может видеть только одну звезду из двух в двойной системе: вторая звезда нередко оказывается слишком слабой, чтобы ее можно было разглядеть даже в телескоп. Но при изучении спектров такой, казалось бы, одиночной звезды астрономы замечают, как спектральные линии звезды строго закономерным образом сдвигаются то в одну, то в другую сторону. Это является еще одним убедительным свидетельством того, что перед нами двойная система, хотя мы видим всего одну звезду. Когда видимая звезда движется в нашу сторону, линии ее спектра немного сдвигаются в синюю сторону. Пройдя половину своей орбиты, видимая звезда станет удалять-

ся от Земли, и ее спектральные линии станут немного сдвинутыми в красную сторону. Тогда мы говорим о *спектрально-двойной* системе.

Бывает, что двойная звезда расположена таким образом, что одна из ее составляющих проходит перед другой. В силу такой случайной ориентации орбит звезд они при наблюдении с Земли поочередно затмевают друг друга. Даже если отдельные звезды подобной пары увидеть невозможно, в момент затмения ближайшая из них будет заслонять часть света, идущего от более далекой. Тогда земной астроном будет замечать временное ослабление общего блеска системы во время каждого затмения. В таком случае речь идет о *затменной двойной системе.*

Для астронома двойные звезды важны потому, что часто можно рассчитать (или по крайней мере оценить) массы этих звезд, проводя достаточно детальные наблюдения их движения. Как упоминалось в гл. 6, анализ наблюдения двойных звезд привел к установлению соотношения *масса–светимость* (см. рис. 6.5), свидетельствующего о наличии прямой связи между массой и светимостью звезд главной последовательности.

В начале 1960-х годов двум советским астрофизикам, Зельдовичу и Гусейнову, пришла в голову интересная мысль. Допустим, что одна звезда двойной системы – это черная дыра. Такая система не может быть визуально-двойной, ибо черная дыра невидима. Подобную систему, вероятно, нельзя обнаружить и как затменную двойную. Даже если орбиты будут в ней ориентированы точно так, как требуется, размеры черной дыры чересчур малы, чтобы экранировать заметную часть света видимой звезды. Но спектрально-двойной такая система может быть. При движении видимой звезды вокруг черной дыры спектральные линии будут смещаться то в красную, то в синюю сторону. Однако второй компонент спектрально-двойной системы может казаться невидимым просто потому, что он очень слаб. Чтобы исключить такое истолкование данных наблюдений, не привлекающих представлений о черной дыре, вспомним, что массивные звезды обычно являются и самыми яркими. Поэтому, если анализ данных наблюдений спектрально-двойной системы покажет, что видимый компонент – это менее массивная звезда, то невидимый (более массивный) компонент может оказаться черной дырой.

Зельдович и Гусейнов проанализировали наблюдения спектрально-двойных за ряд лет. К сожалению, им не удалось сделать надежный и строгий вывод о том, что в известных двойных системах существуют черные дыры.

В конце 1960-х годов новую попытку в том же направлении сделали Тримбл и Торн из Калифорнийского технологического института (США). Были проанализированы списки известных спектрально-двойных звезд, в результате чего выявилось восемь

возможных кандидатов. Во всех этих случаях невидимый компонент должен быть чрезвычайно массивным. Однако Тримбл снова пришел к заключению, что в каждом из выявленных случаев невидимая звезда не должна оказаться обязательно черной дырой. Отнюдь не исключено, что массивная невидимая звезда является обычной звездой, которая просто исключительно слаба по блеску. Поскольку объяснение данных наблюдений оказалось возможным и без привлечения черных дыр, уверенного вывода сделать не удалось. Обнаружить черные дыры в двойных системах казалось невозможным.

В субботу 12 декабря 1970 г. с пусковой установки в Индийском океане у берегов Кении был запущен на околоземную орбиту искусственный спутник. Этот день совпал с днем седьмой годовщины провозглашения независимости Кении, и в качестве признания гостеприимства кенийского народа спутник (это был «Эксплорер-42») окрестили «Ухуру», что на языке суахили означает «свобода». В отличие от всех других ранее запускавшихся спутников единственной задачей «Ухуру» были исследования по рентгеновской астрономии (рис. 13.1 и 13.2). Два рентгеновских

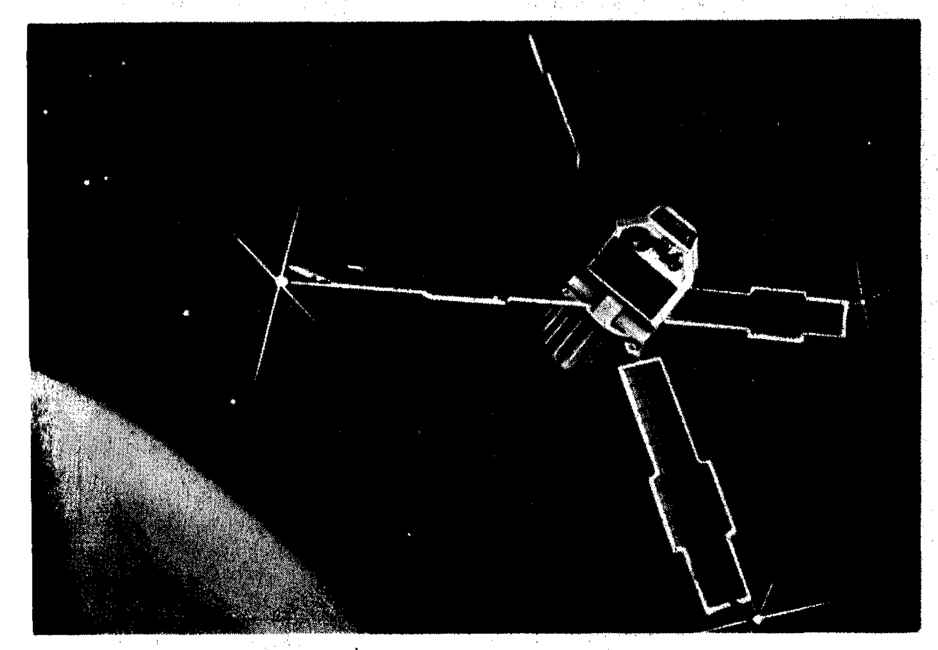


РИС. 13.1.
Спутник «Ухуру». Этот спутник регистрировал рентгеновское излучение от звезд и галактик. После запуска в декабре 1970 г. с помощью «Ухуру» выявлено почти 200 источников рентгеновского излучения на небе. (НАСА.)

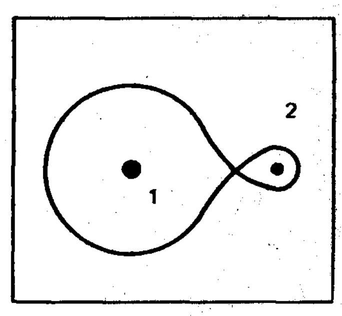


РИС. 13.3.

Предельные поверхности Роша. Вокруг пары звезд, составляющих двойную систему, можно нарисовать кривую, напоминающую восьмерку (мы наблюдаем систему сбоку). Весь газ внутри одной петли восьмерки принадлежит звезде в центре этой петли. Если по какой-то причине газ выбрасывается за пределы поверхности Роша, то выброшенное вещество покидает звезду навсегда. В данном случае звезда 1 более массивна, чем звезда 2.

кой Лагранжа, она определяет *перенос массы* от одной звезды к другой.

Предположим, что одна звезда двойной системы выбрасывает вещество за пределы Роша. Это может случиться по одной из двух причин. Прежде всего в ходе своей эволюции звезды, расширяясь, иногда во много раз увеличивают свои первоначальные размеры. В гл. 6 отмечалось, что это происходит, когда звезды становятся красными гигантами. Если в результате такого превращения звезда в двойной системе становится больше, чем границы ее предела Роша, то эта звезда выбрасывает часть своего вещества в космос. Таким путем одна из звезд двойной системы может потерять значительную долю своей массы.

Второй, значительно более медленнее действующий фактор, влияющий на потерю звездной массы,–это *звездный ветер.* У астрономов имеются веские основания считать, что все звезды постоянно выбрасывают в космос потоки атомных частиц. Так, с помощью искусственных спутников астрономы обнаружили потоки частиц, идущие от Солнца. Это явление называется *солнечным ветром.* Хотя солнечный (или звездный) ветер уносит немного вещества, постепенная утечка частиц в космос может вести к ряду важных последствий. Оба механизма потери массы проиллюстрированы на рис. 13.4.

Когда звезда в двойной системе выбрасывает вещество за пределы Роша, часть его может пройти через внутреннюю точку Лагранжа и упасть на вторую звезду. Если эта вторая звезда достаточно велика, то приходящее вещество станет падать прямо на поверхность звезды-гиганта; тогда говорят, что происходит *аккреция* вещества звездой. Однако если вторая звезда невелика по размерам, приходящее к ней вещество будет захватываться на орбиты вокруг нее. В итоге вещество образует диск или кольцо вокруг звезды–нечто вроде колец Сатурна. Такое кольцо из вещества другой звезды называется *диском аккреции.* Подобно тому как Меркурий обращается вокруг Солнца быстрее, чем Плутон, внутренний край диска аккреции вращается быстрее, чем

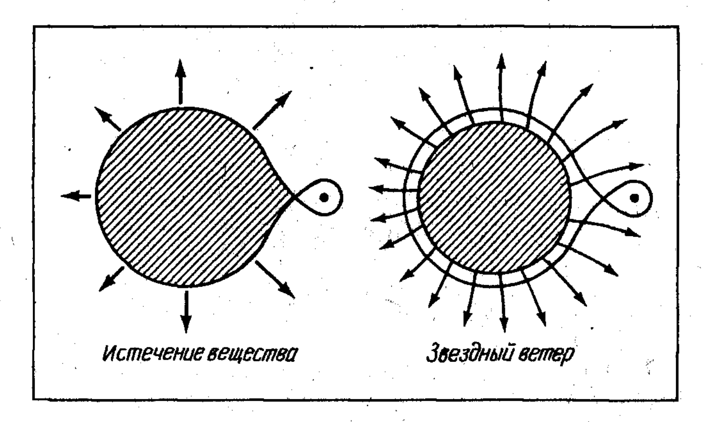


РИС. 13.4.

Потеря массы. Компонент двойной системы может терять массу посредством двух процессов. Если эта звезда переходит свои пределы Роша, скажем просто расширяясь до слишком больших размеров, то в космос может быть выброшено большое количество вещества. Кроме того, частицы, покидающие поверхность звезды в виде звездного ветра, тоже могут выйти за пределы Роша. Второй механизм действует намного медленнее, чем первый.

внешний. Тот факт, что разные части диска аккреции вращаются с различными скоростями, означает, что слои газа внутри диска подвергаются постоянному трению. Такое трение нагревает этот газ и вызывает его спуск по спирали к поверхности звезды. Если эта звезда оказывается нейтронной, обладающей мощным магнитным полем, то аккрецируемое вещество засасывается, как в воронку, к северному и южному магнитным полюсам. Расчеты показывают, что вещество при падении сталкивается с поверхностью нейтронной звезды с такой скоростью, что возникает мощный поток рентгеновских лучей. В этом состоит сущность той модели, с помощью которой астрофизики объясняют свойства рентгеновских пульсаров типа Центавр X-3 и Геркулес X-1.

Если в состав рентгеновских двойных звезд могут входить пульсары, то что можно сказать о черных дырах? Что будет происходить, если в центре диска аккреции окажется не нейтронная звезда, а черная дыра? Для ответа на эти важные вопросы в 1971 г. были начаты подробные теоретические исследования. В Москве Шакура и Сюняев, а в Кембридже Прингл и Рис приступили к ним, опираясь на теорию Ньютона. Хотя их расчеты основывались на классической, а не релятивистской теории, стало ясно, что вещество в диске аккреции вокруг черной дыры может испускать мощный поток рентгеновских лучей. Это замечательное открытие заставило многих других физиков более тщательно повторить подобные же расчеты, привлекая общую теорию относительности. К середине 1970-х годов Торн, Пейдж

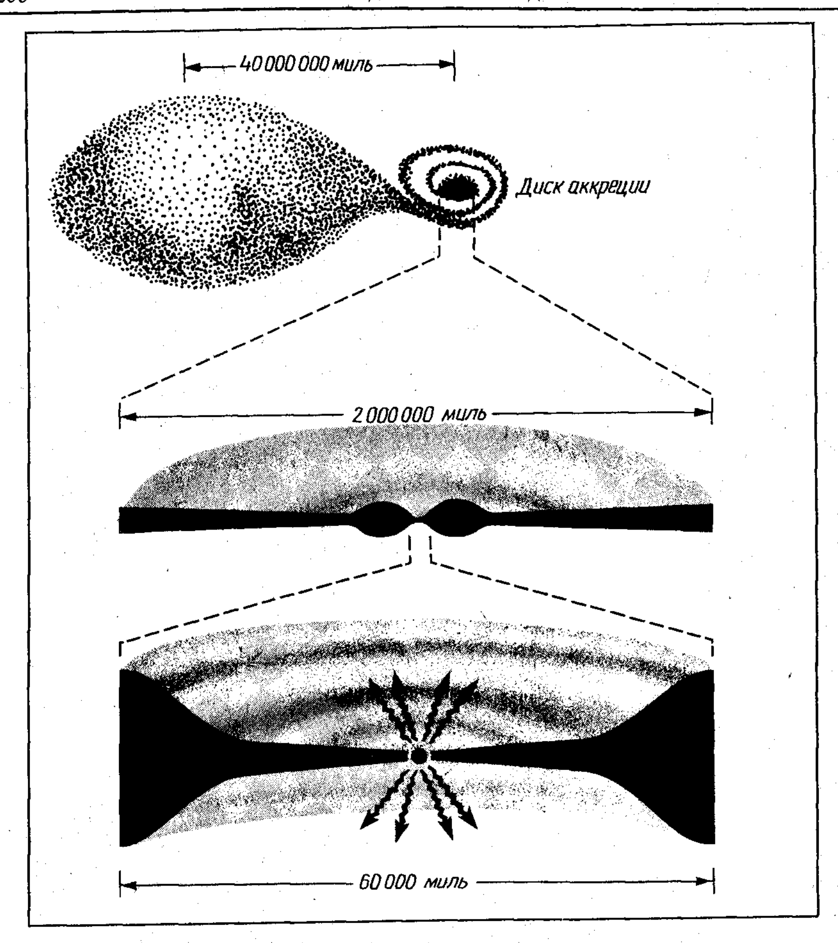


РИС. 13.5.
Диск аккреции вокруг черной дыры. Согласно расчетам Торна и др., поперечник диска аккреции вокруг черной дыры в двойной системе должен быть порядка 3 млн. км. Рентгеновские лучи испускаются сáмой внутренней частью диска на расстоянии всего 300 км от черной дыры. Данный чертеж выполнен в масштабе, соответствующем ожидаемому в случае системы Лебедь X-1.

и Прайс в Калифорнийском технологическом институте (США) сумели разобраться во многих деталях. Построенная модель показана на рис. 13.5.

Если в двойную систему входит черная дыра и обычная звезда, причем последняя изливает вещество через свой предел Роша, то вокруг черной дыры сформируется диск аккреции. По мере перехода газа через внутреннюю точку Лагранжа он будет захватываться на орбиту вокруг черной дыры. Согласно расчетам,

поперечник диска аккреции составит несколько миллионов километров, однако толщина его будет меньше 150 000 км. Такой уплощенный характер диска обусловлен действием на газ центробежной и гравитационной сил. Поскольку расчеты гравитационного поля черной дыры в диске аккреции должны быть по возможности реалистичными, то есть все основания предположить, что черная дыра вращается и потому описывается решением Керра.

Когда газ первоначально захватывается на внешний край диска аккреции, его температура примерно такая же, как на поверхности обычной звезды, откуда он был выброшен. Вскоре газ начинает разогреваться благодаря трению между его слоями, вращающимися вокруг черной дыры на разных расстояниях. Под действием трения температура газа растет по мере того, как он по спирали опускается вниз к черной дыре. С ростом температуры «спиралящегося» газа увеличивается и давление внутри диска. Возросшее давление газа стремится расширить диск в толщину. Однако на большей части диска гравитационное поле вращающейся черной дыры достаточно сильно для того, чтобы диск оставался очень тонким. Лишь на высоте около 80 000 км над дырой давление газа оказывается настолько сильным, что диск «толстеет». Поэтому внутренняя часть диска аккреции содержит «раздутый» участок с поперечником около 150 000 км.

В среднем порции газа требуется несколько недель или месяцев для того, чтобы пройти по спирали от внешнего края диска аккреции до внутреннего. Когда газ оказывается на расстоянии нескольких сотен километров от черной дыры, он разогревается благодаря внутреннему трению до температуры в десятки миллионов градусов. Любое вещество, нагретое до столь высоких температур, начинает интенсивно испускать рентгеновские лучи. Их интенсивность должна быть столь велика, что спутник «Ухуру» обязательно должен был зарегистрировать любую черную дыру с диском аккреции, если только она находится не слишком далеко от нас. У внутреннего края диска аккреции гравитационное поле дыры настолько сильно, что спускающийся по спирали газ засасывается здесь в дыру за доли секунды.

Если посмотреть на список восьми рентгеновских двойных звезд, то из списка кандидатов в черные дыры сразу исключаются четыре пульсара. Никакой механизм, связанный с черными дырами, не может порождать регулярных импульсов, так что при наличии подобных импульсов наиболее разумным объяснением является нейтронная звезда, а не черная дыра. Что же можно сказать об остальных четырех? Они могут оказаться черными дырами, но это могут быть и нейтронные звезды, расположенные относительно Земли так, что мы не наблюдаем на Земле излучаемых ими импульсов, а может быть, это даже белые кар-

лики в центре диска аккреции. Каким же путем астроном сможет сделать надежный выбор из всех перечисленных возможностей?

Здесь нужно принять во внимание два важных обстоятельства. Прежде всего, в гл. 7 уже отмечалось, что для масс белых карликов и нейтронных звезд существуют строгие верхние пределы. Предел Чандрасекара для белых карликов равен 1,25 массы Солнца; сдержать коллапс мертвой звезды с массой более трех солнечных не может даже давление вырожденного нейтронного газа. Любая мертвая звезда с массой более трех солнечных *должна* быть черной дырой.

Во-вторых, подробное исследование орбит звезд в двойных системах часто позволяет надежно оценить характеристики этих звезд. Иными словами, из наблюдения орбит звезд в рентгеновских двойных системах возможно в каждом случае рассчитать массы обеих звезд. Если звезда в центре диска аккреции имеет массу больше трех солнечных, *она должна быть* черной дырой.

В принципе описанный рецепт обнаружения черной дыры кажется совсем простым. Но на практике дело обстоит крайне сложно. Прежде всего астрономы должны *наблюдать обе* звезды в двойной системе. Но одна из звезд (черная дыра) испускает только рентгеновские лучи, и поэтому в оптическом спектре спектральные линии от нее будут отсутствовать. Кроме того, астрономы должны отыскать *видимую* звезду, входящую в каждую рентгеновскую двойную, которую они исследуют. Поэтому в начале 1970-х годов астрономы выбивались из сил, пытаясь разыскать видимые звезды, принадлежащие рентгеновским двойным системам. Лишь при таком условии можно воспользоваться обычными телескопами, размещенными на поверхности Земли, для исследования видимых компонентов, надеясь получить надежные оценки масс рентгеновских звезд. Поиск видимых компонентов начался с получения точных координат каждого из восьми рентгеновских источников. После определения координат астрономы начали «прочесывать» небо в соответствующих местах в поисках видимых звезд, которые обладали бы признаками принадлежности к двойным системам. В семи случаях из восьми астрономам удалось отождествить те видимые звезды, которые удовлетворяли всем необходимым требованиям. Эти семь видимых звезд перечислены в табл. 13.2.

К середине 1970-х годов подробные наблюдения семи видимых звезд, входящих в состав рентгеновских двойных систем, были завершены. Поскольку в каждой системе из двух звезд с помощью обычных телескопов можно было наблюдать только одну, астрономам пришлось отказаться от оценки масс рентгеновских звезд. Точные массы могут быть рассчитаны лишь тогда, когда видимы обе звезды системы. Как отмечалось выше, в четырех из этих семи двойных систем компонентами были

Таблица 13.2

ВИДИМЫЕ ЗВЕЗДЫ В РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Название рентгеновского источника		Название видимой звезды	Блеск видимого компонента
3U 0115 – 73	(SMC X-1)	Сэндулик 160	13^m
3U 0900 – 40	(Парус X-1)	HD 77851	8
3U 1118 – 60	(Центавр X-3)	Звезда Кшеминского	13
3U 1617 – 15	(Скорпион X-1)	Нет названия	12
3U 1653 + 35	(Геркулес X-1)	HZ Геркулеса	14
3U 1700 – 37		HD 153919	7
3U 1956 + 35	(Лебедь X-1)	HDE 226868	9

рентгеновские пульсары; оценки масс рентгеновских звезд дали значение около двух масс Солнца. Такой результат согласуется с представлением, что каждый рентгеновский пульсар – это нейтронная звезда в центре диска аккреции.

В двух из оставшихся трех систем надежных выводов получить не удалось. Лучшее, что можно сказать,– это что массы этих рентгеновских звезд равны, самое большее, «нескольким» массам Солнца. Итак, массы рентгеновских звезд в 3U 1617-15 и 3U 1700-37 не были с уверенностью признаны превышающими критическое значение в три солнечные массы. Однако с источником Лебедь X-1 дело обстоит иначе.

Выяснилось, что источник Лебедь X-1 связан с горячей (25 000 K) голубой звездой HDE 226868 (рис. 13.6). Эта звезда спектрально-двойная, и линии ее спектра смещаются то в ту, то в другую сторону с периодом около 5,5 сут. Горячие голубые звезды обычно имеют очень большие массы. Масса звезды HDE 226868, по-видимому, превышает 20 солнечных. По наблюдениям сдвига спектральных линий и в предположении, что масса видимой звезды равна 20 массам Солнца, можно рассчитать достаточно надежные пределы для массы самого источника Лебедь X-1. Этот объект должен иметь массу по крайней мере 8 солнечных масс! Поскольку это значение, бесспорно, превышает предельную массу нейтронной звезды, то представляется вполне резонным заключение о том, что Лебедь X-1 – это черная дыра!

Все, что мы знаем о Лебеде X-1, можно объяснить и понять в рамках модели черной дыры в центре диска аккреции. Хотя это и не доказывает того, что Лебедь X-1 действительно является черной дырой, подавляющее большинство данных говорит

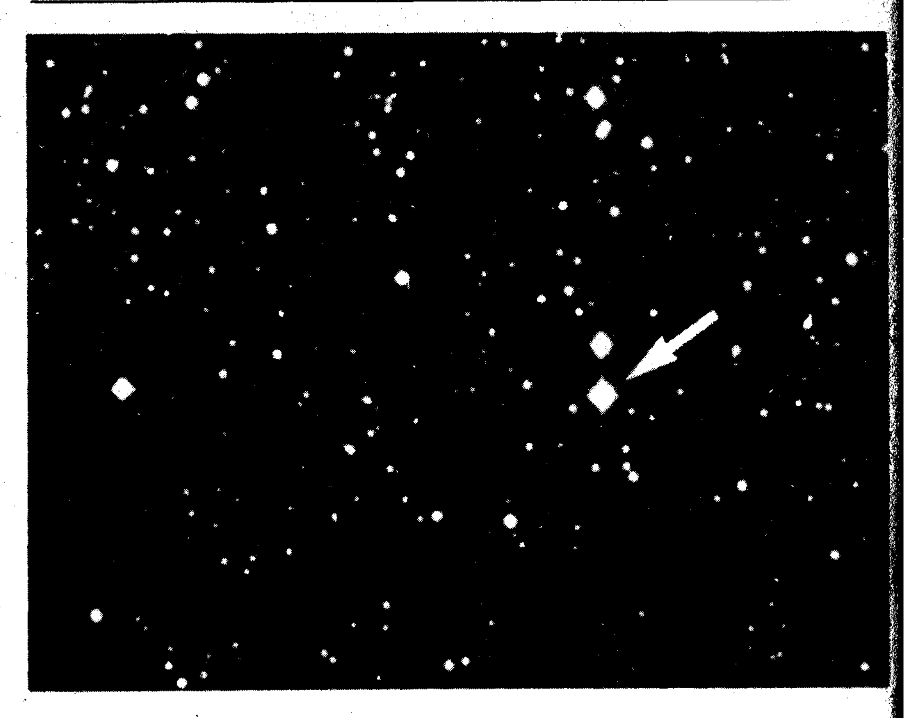


РИС. 13.6.
Звезда HDE *226868*. Эта видимая звезда, связанная с источником Лебедь Х-1,—горячая голубая звезда, находящаяся от нас на расстоянии 10000 световых лет. Изучая эту звезду, астрономы пришли к заключению, что масса Лебедя Х-1, вероятно, превышает 8 солнечных масс. (Национальное географическое общество и Служба картографирования неба Паломарской обсерватории. С разрешения обсерватории им. Хейла.)

в пользу их истолкования в рамках гипотезы о черной дыре, хотя ряд астрономов продолжают сомневаться в этом.

Следует подчеркнуть, что отождествление Лебедя Х-1 с черной дырой критически зависит от «негативных» доводов (например: это не может быть белый карлик; это не может быть нейтронная звезда). Позитивные доводы были бы намного сильнее. Какие именно наблюдения Лебедя Х-1 (или другой аналогичной системы) могли бы доказать, что это обязательно черная дыра? Какие эффекты имеют место только для черной дыры и невозможны для любого другого типа объектов?

Как указывалось выше, внутренний край диска аккреции, окружающего черную дыру, должен вращаться вокруг нее с чрезвычайно высокой скоростью. Один оборот внутреннего края диска должен, вероятно, происходить всего за несколько сотых или тысячных секунды. Естественно предположить, что этот

внутренний край диска аккреции не вполне однороден. На нем могут быть «горячие пятна». При каждом обороте такого «горячего пятна» вокруг черной дыры астрономы должны наблюдать кратковременную интенсивную вспышку рентгеновского излучения вдобавок к тем рентгеновским лучам, которые испускаются диском постоянно. Если бы такие добавочные вспышки наблюдались чаще чем раз в 1/100 с, то это могло бы стать прямым подтверждением наблюдения черной дыры.

К сожалению, спутник «Ухуру» не мог регистрировать очень быстрых изменений рентгеновского излучения. Вообще говоря, *кажется*, что Лебедь Х-1 испускает такие короткие вспышки, но астрономы не перестанут быть скептиками, пока на околоземные орбиты не будут выведены усовершенствованные рентгеновские телескопы. При этом следует отметить, что источник Циркуль Х-1 (3U 1516-56), также, по-видимому, испускает короткие вспышки рентгеновских лучей. Хотя видимый компонент Циркуля Х-1 еще не отождествлен, сходство параметров рентгеновского излучения Лебедя Х-1 и Циркуля Х-1 бросается в глаза. Так что не исключено, что астрономы уже открыли вторую черную дыру.

Поскольку представляется вполне вероятным, что Лебедь Х-1 – это черная дыра, астрофизики приступили к подробным расчетам, чтобы понять, каким путем эволюция двойной звездной системы может привести к возникновению черной дыры. Ввиду того что обнаружить черную дыру можно только по излучению падающего на нее вещества, выброшенного обычным компонентом двойной системы, две звезды должны быть довольно близки друг к другу. Если бы эти звезды находились друг от друга на большом расстоянии (как это бывает обычно), черная дыра не могла бы захватывать достаточно вещества, чтобы началось рентгеновское излучение. Поэтому внимание было сосредоточено на эволюции *тесных двойных систем.*

Пусть две звезды сформировались очень близко одна от другой и образовали тесную двойную систему, обозначенную как стадия 1 на рис. 13.7. Сначала в недрах обеих звезд шло «горение» водорода, однако более массивная звезда сжигала свой водород быстрее и потому быстрее эволюционировала. Вскоре она заполнила свои пределы Роша и передала большое количество вещества своему компаньону (стадия 2). Вследствие переноса массы второй компонент двойной системы стал теперь более массивной звездой (стадия 3). После вспышки сверхновой образовалась черная дыра, если умирающая звезда сохранила достаточную массу, чтобы гравитация пересилила давление газа, иначе получился бы белый карлик или нейтронная звезда (стадии 4 и 5). Получившуюся черную дыру было невозможно обнаружить, пока ее компаньон не проэволюционировал до стадии, на которой началось испускание сильного звездного ветра. Лишь тогда

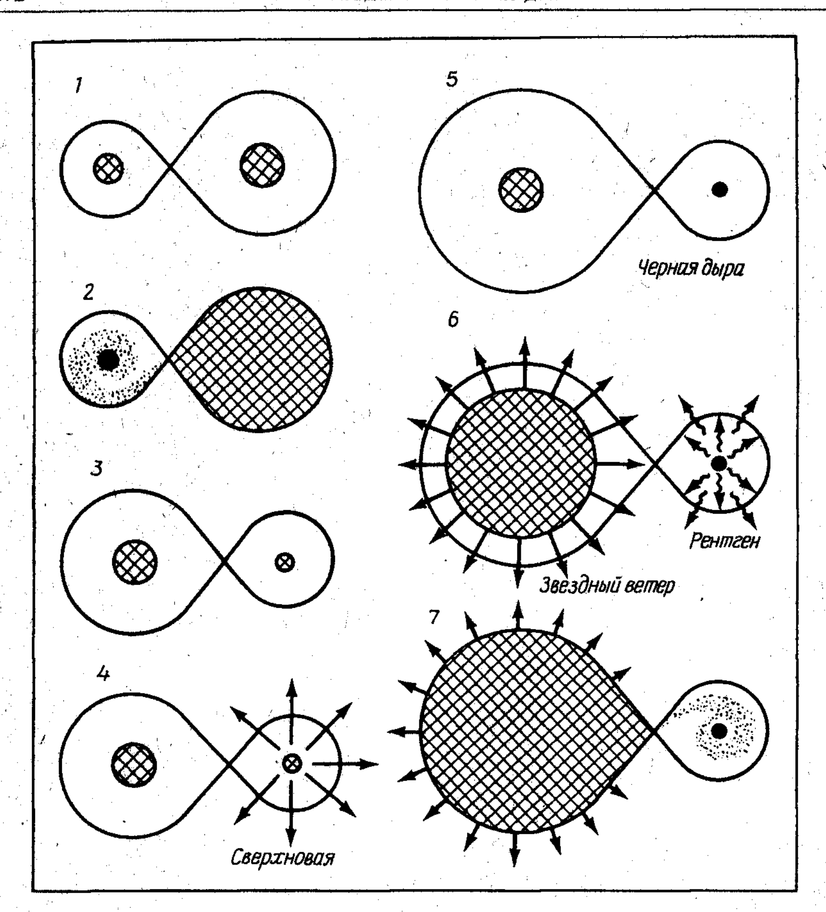


РИС. 13.7.
Черная дыра в тесной двойной системе. На основании расчетов де Лоора и де Грева изображены основные этапы эволюции тесной двойной системы звезд. Эта двойная испускает рентгеновское излучение лишь в течение короткого периода за весь свой жизненный цикл.

черная дыра смогла захватить достаточно газа, чтобы образовался диск аккреции, испускающий рентгеновские лучи (стадия 6). Наконец, когда второй компонент проэволюционировал так далеко, что заполнил свои пределы Роша, через внутреннюю точку Лагранжа к черной дыре стали поступать огромные количества вещества. Этот поток вещества «забил» выход рентгеновского излучения, и черная дыра снова стала ненаблюдаемой (стадия 7).

Описанный сценарий подсказал астрономам, что стадия развития тесной двойной системы, в ходе которой наблюдается

рентгеновское излучение, очень кратка. Расчеты показывают, что тесные двойные системы должны испускать рентгеновское излучение в течение менее 0,5% своего времени жизни. Значит, согласно теории вероятности, лишь одна из нескольких сотен тесных двойных систем могла бы давать поддающийся обнаружению поток рентгеновских лучей. На каждый источник типа Лебедя Х-1 может оказаться несколько сотен черных дыр, входящих в состав тесных двойных систем, не дающих никакого наблюдаемого излучения.

Анализируя наблюдения звездоподобных источников рентгеновского излучения в ходе поисков черных дыр, астрономы пришли к замечательному открытию, о котором стало известно весной 1976 г. С помощью так называемого «Голландского астрономического спутника», запущенного на полярную околоземную орбиту 30 августа 1974 г., астрономы приступили к наблюдениям ряда рентгеновских источников, входящих в 3-й каталог «Ухуру». 28 сентября 1975 г. при наблюдении источника 3U 1820-30 с помощью новых рентгеновских телескопов на борту этого спутника они обнаружили исключительно сильную вспышку рентгеновского излучения. Менее чем за 1 с интенсивность рентгеновского излучения источника 3U 1820-30 возросла примерно в 25 раз. В течение последующих 8 с интенсивность рентгеновского излучения постепенно возвратилась на свой

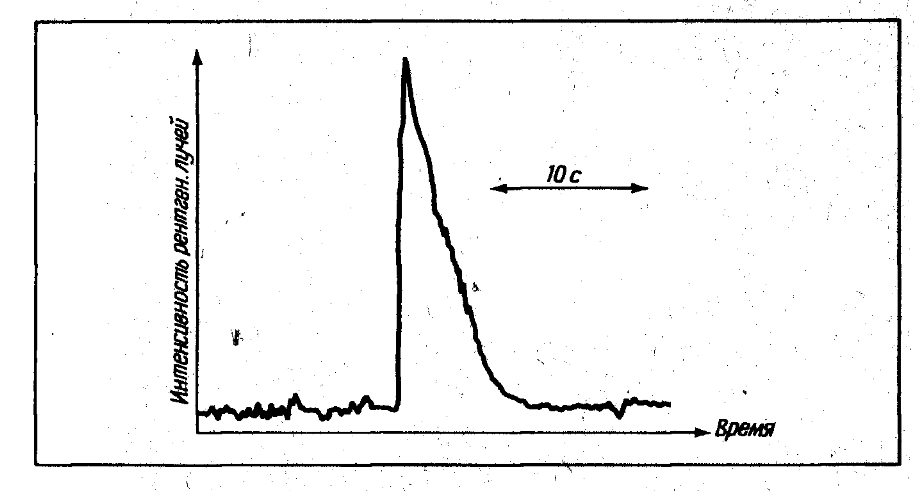


РИС. 13.8.
Интенсивная вспышка рентгеновского излучения. Зарегистрированы исключительно интенсивные вспышки рентгеновского излучения от источников, находящихся в шаровых скоплениях. Менее чем за 1 с интенсивность рентгеновского излучения возросла в 25 раз. В течение последующих 8 с интенсивность упала до первоначального уровня.

14

БЕЛЫЕ ДЫРЫ И РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ

Возможность существования в космосе черных дыр – это одно из самых замечательных предсказаний теоретической физики XX в. Мысль о том, что черные дыры должны существовать реально, является прямым выводом из современных представлений об эволюции звезд. Умирая, массивные звезды катастрофически сжимаются (коллапсируют) – как бы взрываются внутрь – и порождают область, в которой тяготение настолько сильно, что оттуда не может выйти ничто – даже свет.

При анализе характеристик черных дыр, выведенных из теории, было отмечено, что все эти дыры должны обладать массой. Вдобавок к массе они могут обладать также зарядом и (или) моментом количества движения. Вообще говоря, черная дыра, которая может существовать реально, имеет, вероятно, ничтожно малый заряд, но вращается очень быстро. Поэтому такую дыру хорошо описывает решение Керра.

Из описанного выше теоретического анализа следует, что полная геометрическая структура даже идеальной черной дыры чрезвычайно сложна. Ведь в глобальной структуре пространства-времени дыры объединено множество Вселенных – это видно из диаграмм Пенроуза. В случае простейшей черной дыры, которая характеризуется только массой (это шварцшильдовская черная дыра, представленная на рис. 9.11 и 9.18), помимо нашей собственной Вселенной существует еще одна, иная. Ввиду пространственноподобного характера шварцшильдовской сингулярности в эту другую Вселенную невозможно проникнуть из нашей Вселенной, если пользоваться любыми допустимыми (временноподобными) мировыми линиями. Однако, как только у дыры будет либо заряд, либо вращение, сингулярность становится временноподобной, и полная геометрическая структура решений Райснера–Нордстрёма или Керра объединяет бесконечно большое число Вселенных прошлого и будущего (см. рис. 10.10 и 11.14). Свойство решений Керра и Райснера–Нордстрёма включать множество Вселенных приводит к поразительной возможности гипотетических путешествий в черные дыры, а из них – во Все

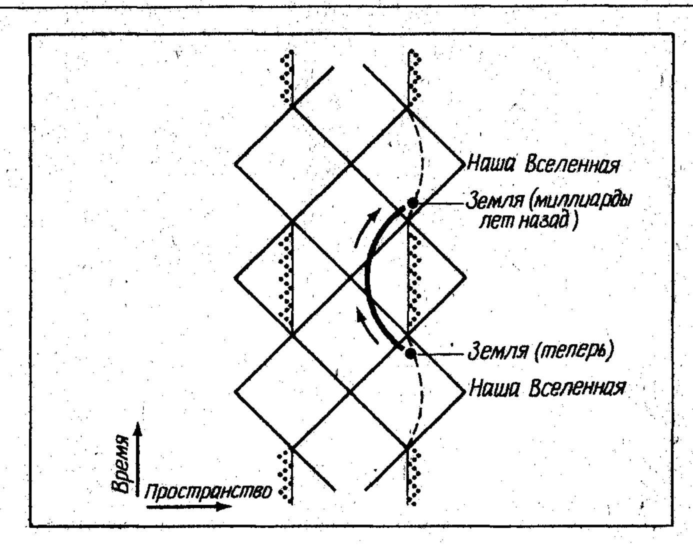


РИС. 14.1.
Машина времени. Если та или иная Вселенная на диаграмме Пенроуза – это в действительности наша Вселенная в более ранние моменты времени, то космонавт может, вылетев сейчас с Земли, вернуться на Землю в прошлом, пройдя через черную дыру.

ленные будущего, что мы обсуждали в гл. 12. Тем самым появляется возможность машины времени!

«Другие» Вселенные, появившиеся на диаграмме Пенроуза, можно истолковать разными способами. Один способ – это сказать, что на самом деле это разные, отдельные Вселенные, вообще никак не связанные с нашей Вселенной. Столь же приемлема и другая трактовка: ряд этих «других» Вселенных на самом деле являются вариантами нашей собственной Вселенной, но отнесенными к иной эпохе. Иными словами, теоретически не исключено, чтобы одна из «других» Вселенных на диаграмме Пенроуза была *нашей* Вселенной, скажем, миллиард лет назад, как это показано на рис. 14.1. Смельчак-космонавт мог бы, покинув Землю сейчас и нырнув в черную дыру, вынырнуть в нашей же Вселенной в прошлом. Это – путешествие во времени.

Аналогично какая-то другая Вселенная на диаграмме Пенроуза могла бы на самом деле быть нашей собственной Вселенной в очень далеком будущем. Тогда наш космонавт мог бы, улетев с Земли, вернуться на нее через миллиарды лет в будущем, просто-напросто отправившись в соответствующую Вселенную на диаграмме Пенроуза.

Хотя на рис. 14.1 изображена диаграмма Пенроуза для керровской черной дыры (с сингулярностями, обозначенными пунктиром, и отрицательными Вселенными), те же в общем характе-

ристики свойственны и черной дыре Райснера–Нордстрёма. В любом случае, истолковывая ряд других Вселенных как иные варианты нашей собственной Вселенной в разные времена, мы могли бы путешествовать в прошлое и в будущее.

В общем-то мысль о возможности существования машины времени ученым не по душе. Ведь тогда могли бы происходить поистине чудовищные вещи. Представим себе, например, космонавта, вылетевшего с Земли и нырнувшего во вращающуюся или заряженную черную дыру. Немного пространствовав там, он обнаружит Вселенную, являющуюся его же собственной, только на 10 мин более ранней во времени. Войдя в эту более раннюю Вселенную, он обнаружит, что все обстоит так, как было за несколько минут до его отправления. Он может даже встретить самого себя, полностью готового к посадке в космический корабль (рис. 14.2). Встретив самого себя, он может рассказать себе же, как он славно попутешествовал. Затем, вдвоем с самим собой, он может сесть в ожидающий космический корабль, и он (или правильнее сказать: они?..) может (вдвоем!) снова повторить тот же полет!

Описанное путешествие – наглядное свидетельство того, как машина времени нарушает *принцип причинности*. Принцип причинности сводится, по существу, к простому утверждению, что следствие бывает *после* причины. Если у вас в комнате внезапно зажглась лампочка, то резонно предположить, что кто-то долей секунды раньше щелкнул выключателем. И было бы абсурдным думать, что лампочка может зажечься *сейчас* потому, что кто-то *через* десять лет, в будущем, повернет выключатель. Сама мысль о том, что следствия могут происходить *до* их причин, отвергается человеческим умом.

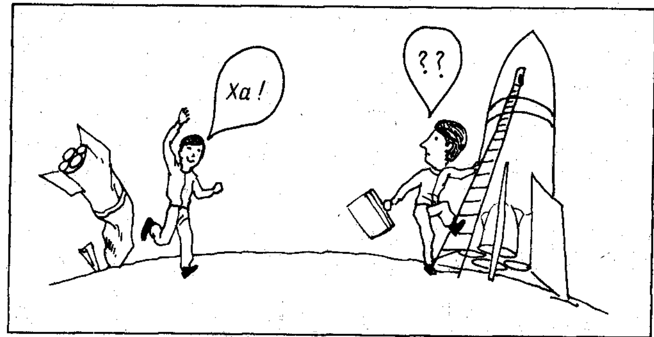


РИС. 14.2.
Нарушение принципа причинности. Вернувшись в свою собственную Вселенную немного раньше времени своего отправления, космонавт может встретить самого себя, садящегося в космический корабль. Это – нарушение принципа причинности!

Поэтому существуют две возможности. Первая: возможно, причинность нарушается? Это означало бы, что физическая действительность иррациональна на самом фундаментальном уровне, т. е. мир абсолютно безумен, а кажущаяся его рациональность – чисто воображаемая, искусственно вложенная в ум человека. Может быть, ученые уверовали в причинность, надеясь понять мир, который вообще непознаваем?..

Вторая возможность: диаграммы Пенроуза – не последняя инстанция в постижении истины. Может быть, действуют какие-то дополнительные физические эффекты, предотвращающие возможность путешествия в другие Вселенные. Может быть, диаграммы Пенроуза – это такая идеализация, которая не описывает ничего, могущего существовать реально.

Диаграммы Крускала–Секереша и Пенроуза были созданы для того, чтобы полнее и нагляднее понять геометрию пространства-времени черной дыры. С помощью этих диаграмм удается понять многие свойства черных дыр. Помимо того, эти диаграммы предсказывают кое-что новое. Например, на рис. 14.3 изображена диаграмма Крускала–Секереша для шварцшильдовской черной дыры. Все как полагается – вещество из нашей Вселенной падает сквозь горизонт событий внутрь и сталкивается с сингулярностью. Но предположим, что вблизи сингулярности прошлого уже были вещество и излучение. Тогда с течением времени эти вещество и излучение выйдут из-под горизонта событий, находящегося в прошлом, и перейдут в нашу Вселенную. Это и есть *белая дыра*, изображенная на рис. 14.4.

Представим себе теперь вещество, выбрасываемое из области вблизи сингулярности прошлого, поднимающееся на некоторую высоту над черной дырой, а затем падающее опять на нее. Как показано на рис. 14.5, диаграмма Крускала–Секереша в принципе допускает такой процесс, поскольку мировые линии вещества повсюду времениподобны. Объект с таким поведением именуется *серой дырой*.

Если представление о черной дыре появилось из исследования эволюции звезд, то идея о серой дыре или белой возникла чисто математически в связи с решением Шварцшильда. Но следует ли нам принять на веру возможность реального существования во Вселенной – наряду с машинами времени – белых дыр и серых дыр?

Представим себе умирающую массивную звезду, при коллапсе которой образуется черная дыра. Первоначально сингулярности не было; отсутствовал и горизонт событий. Поэтому ни сингулярности прошлого, ни горизонта событий в прошлом быть не могло. Имеются только горизонт событий в будущем и сингулярность будущего, так как черная дыра формируется в будущем – после смерти звезды. Иными словами, как показано на

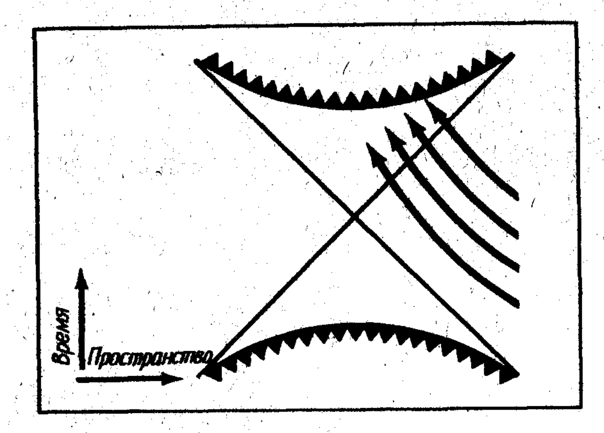


РИС. 14.3.

Черная дыра. В случае шварцшильдовской черной дыры все падающее на нее вещество и излучение проходят через горизонт событий и разрушаются, попадая в сингулярность.

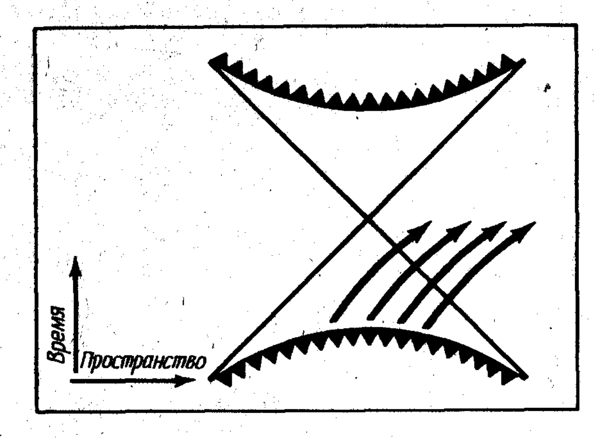


РИС. 14.4.

Белая дыра. Можно представить себе, как вещество и излучение в области пространства-времени вблизи сингулярности прошлого могут выйти в нашу Вселенную. Именно это и приводит к эффекту белой дыры.

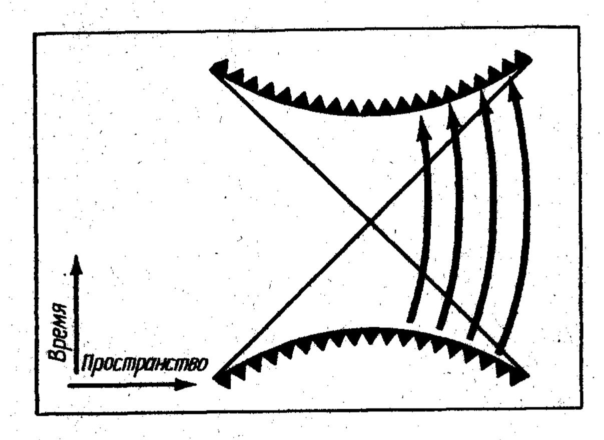


РИС. 14.5.

Серая дыра. Аналогично рис. 14.4 вещество из области вблизи сингулярности прошлого может вырваться в нашу Вселенную, но лишь затем, чтобы снова упасть в дыру и встретиться с сингулярностью будущего.

рис. 14.6, область, занятая веществом звезды, «вырезает» значительную часть диаграммы Крускала–Секереша. И только выше поверхности звезды пространство-время достаточно верно описывается решением Шварцшильда. Поэтому, если это решение применять с учетом реалистических ограничений, серых и белых дыр существовать не должно. У коллапсирующей звезды, превращающейся в шварцшильдовскую черную дыру, попросту нет сингулярности прошлого или горизонта событий в прошлом. Нет и «другой Вселенной».

Но хотя анализ процессов, происходящих при умирании звезд, исключает возможность образования шварцшильдовских как серых, так и белых дыр, трудности еще не исчерпаны. Как уже неоднократно отмечалось, реальные звезды вращаются, а следовательно, из них должны возникать керровские черные дыры. Полная структура пространства-времени керровской черной дыры представлена на диаграмме Пенроуза, где сингулярности времениподобны. Если представить себе, что реальная звезда коллапсирует, образуя керровскую черную дыру, то из рассмотрения выпадут большие участки пространства-времени, которые находятся над поверхностью звезды. И все же, как видно из рис. 14.7, подобная звезда, дающая черную дыру в одной Вселенной, может проявляться как белая дыра в другой Вселенной. Вследствие времениподобного характера сингулярности звезда может, коллапсируя в одной Вселенной, расширяться в другую Вселенную. Поэтому представляется, что решение Керра (как и решение Райснера–Нордстрёма, также имеющее времениподобные сингулярности) допускает возможность существования белых дыр.

Представление о шварцшильдовских белых дырах было возрождено в середине 1960-х годов советским ученым И. Д. Новиковым. Хотя шварцшильдовские белые дыры не могут образоваться при смерти звезд, они могут быть, по мысли Новикова, связаны с рождением наблюдаемой нами Вселенной. Большинство астрономов считают, что начало Вселенной определилось чудовищным взрывом первичного бесконечно плотного состояния. Иначе говоря, вся Вселенная, наблюдаемая нами, должна была представлять собой одну гигантскую сингулярность, которая по неизвестной нам причине вдруг взорвалась. Допустим, что какие-то отдельные области не приняли участия в этом всеобщем расширении Вселенной, иными словами, по какой-то причине небольшой «кусочек» первичной сингулярности сумел сохраниться, не расширяясь, в течение очень длительного времени. Когда же подобный «отсталый элемент» начал, наконец, расширяться, он должен проявлять все свойства белой дыры. Такой отсталый элемент – в буквальном смысле кусочек сингулярности прошлого (Большого Взрыва), из которой в нашу Вселенную

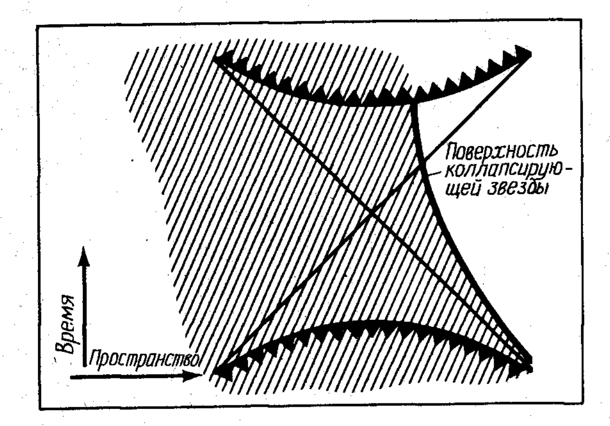


РИС. 14.6.
Образование черной дыры. Когда умирающая звезда коллапсирует, образуя шварцшильдовскую черную дыру, бо́льшая часть диаграммы Крускала–Секереша «вырезается» веществом звезды.

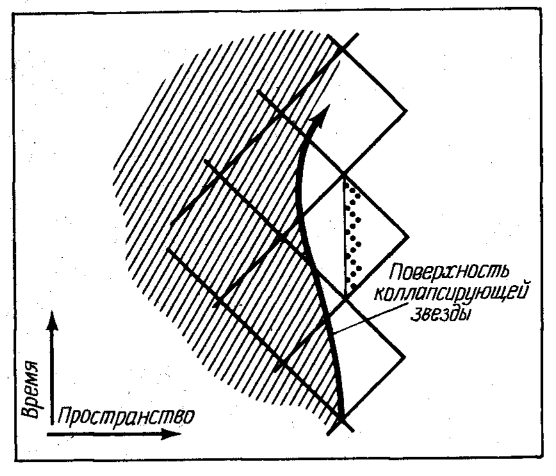


РИС. 14.7.
Керровская белая дыр При образовании вра щающейся черной дыры в нашей Вселенной могл бы появиться и белая ды ра в другой Вселенно

вторглись вещество и излучение. Мысль о том, что маленьки кусочки Большого Взрыва могли сохраниться в течение длитель ного времени, привела Новикова к предположению о возможно сти существования шварцшильдовских белых дыр.

Проблема шварцшильдовских белых дыр рассматривалас Д. М. Эрдли в Калифорнийском технологическом институте в на чале 1970-х годов. Эрдли понимал, что если от Большого Взрыв и сохранились «отсталые» элементы, то они должны выглядет как кусочки сингулярности прошлого, а поэтому их должен окру жать горизонт событий в прошлом (рис. 14.8). Но что нам из вестно о горизонте событий? В обычных черных дырах горизон событий соответствует остановке времени с точки зрения удален ного наблюдателя. Для такого наблюдателя свет, приходящий и окрестностей горизонта событий, испытывает сильнейшее крас

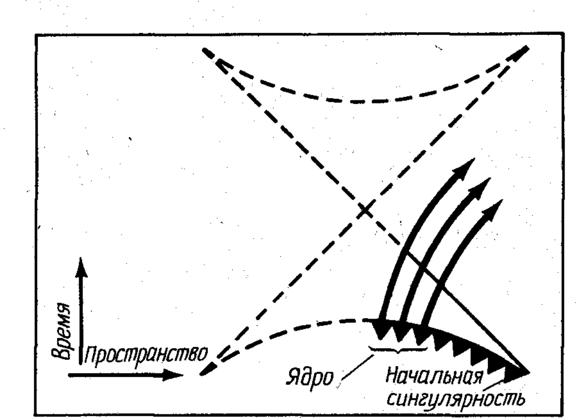


РИС. 14.8.
«Спящий зародыш». Если «кусочек» Большого Взрыва не стал расширяться вместе со всей Вселенной, то он мог бы проявить себя позднее в виде шварцшильдовской белой дыры.



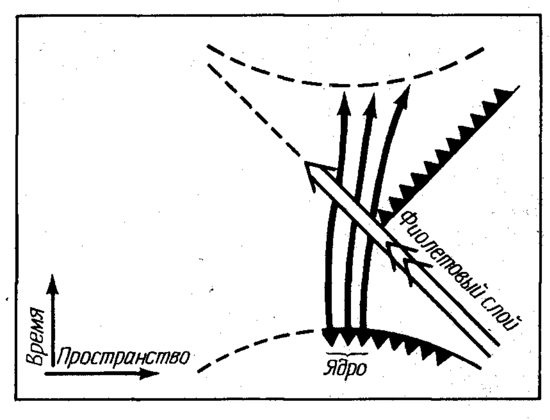


РИС. 14.9.
Смерть белой дыры. Если бы могла существовать потенциальная белая дыра – «спящий зародыш», оставшийся от Большого Взрыва,– то она собрала бы на себе столько света, что образовалась бы черная дыра. Так потенциальная белая дыра превратилась бы за очень короткое время в черную дыру.

ное смещение. Грубо говоря, свет из окрестностей горизонта событий затрачивает очень много энергии, выбираясь из области сильного гравитационного поля, окружающего обычную черную дыру. Обратно, если свет падает в черную дыру, он должен приобретать много энергии. Падающий внутрь дыры свет должен испытывать сильное фиолетовое смещение.

Представим себе на мгновение очень ранний этап эволюции Вселенной. Если Большой Взрыв действительно имел место, то Вселенная первоначально должна быть чрезвычайно горячей. При чудовищных температурах в триллионы градусов Вселенная должна была заполняться мощнейшим излучением. Если от Большого Взрыва остались «спящие зародыши», то такое излучение (а оно уже было очень сильным) должно подвергаться сильнейшему фиолетовому смещению при падении на горизонт

событий, окружающий эти зародыши. Вокруг каждого «спящего зародыша» накапливалось грандиозное количество крайне мощного излучения. Иначе говоря, на диаграмме Пенроуза свет, идущий от $\mathscr{I}^-$, собирается вблизи горизонта событий прошлого, образуя фиолетовый слой. Через очень короткое время в фиолетовом слое собирается так много света, что его энергия (и связанная с ней масса) сама начинает сильно искривлять пространство-время. Согласно расчетам Эрдли, свет, собирающийся вокруг «спящих зародышей», настолько сильно искривляет пространство-время, что *вокруг потенциальной белой дыры образуется черная дыра.* Как показано на рис. 14.9, при этом образуются горизонт событий в будущем и сингулярность. Такое превращение потенциальной белой дыры в черную дыру происходит примерно за 1/1000 с. Значит, если какие-либо «спящие зародыши» и существовали, они должны были превратиться в черные дыры вскоре после рождения нашей Вселенной.

Расчеты Эрдли надежно «закрыли» возможность существования в природе шварцшильдовских белых дыр. Но что можно сказать о белых дырах Райснера–Нордстрёма или о керровских белых дырах? Хотя детальные расчеты еще не проделаны, соображения Эрдли здесь также остаются в силе. Чтобы могла появиться одна из таких более сложных белых дыр, должно существовать и несколько внутренних и внешних горизонтов событий, через которые вещество может переходить из одной Вселенной в другую, следующую. При анализе диаграммы Пенроуза для заряженной или вращающейся черной дыры нетрудно видеть, что горизонт событий в будущем для одной Вселенной является одновременно горизонтом событий в прошлом для другой Вселенной. Горизонт событий, сквозь который вещество «проваливается» в черную дыру в одной Вселенной,– это одновременно и горизонт событий, через который вещество извергается из черной дыры в следующую Вселенную. Значит, если существуют белые дыры Райснера–Нордстрёма или Керра, то у них *должны* быть горизонты событий в прошлом. А если белая дыра в какой-то Вселенной обладает горизонтом событий в прошлом, то с самого рождения этой Вселенной вблизи горизонта будет собираться свет. Такой горизонт *должен* породить фиолетовый слой. В согласии с доводами Эрдли, света должно собраться столько, что скопившаяся в фиолетовом слое энергия сделает горизонт событий неустойчивым. В результате поверх потенциальной белой дыры сформируется черная дыра, а получившаяся сингулярность поглотит все окружающее. Хотя детальные расчеты еще ждут своего исполнителя, представляется вполне разумным предположение, что в диаграмме Пенроуза для *реальной* заряженной или вращающейся черной дыры образуется *пространственноподобная* сингулярность, которая отрежет все Вселенные будущего.



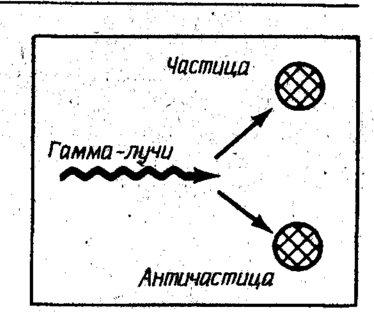


РИС. 14.10.
Рождение пары. Гамма-лучи высокой энергии способны порождать пары частиц и античастиц (например, электрон и позитрон или протон и антипротон). Вещество и антивещество всегда возникают в одинаковых количествах.

Вопрос только в том, насколько быстро этой произойдет. Ответить на него можно, если знать, насколько быстро в фиолетовом слое вдоль горизонта событий, открытого в бесконечность $\mathscr{I}^-$ некоторой конкретной Вселенной, скапливается свет. Если те физики, которым по душе мысль о белых дырах, попробуют утверждать, что вызванная фиолетовым слоем неизбежная неустойчивость образуется медленно, то им придется иметь дело с трудностью совершенно нового свойства, касающейся вещества и антивещества.

Наука уже в течение многих лет знает о существовании антивещества. Впервые оно было открыто в ливнях космических лучей, а теперь античастицы всех видов регулярно получают при лабораторных экспериментах по ядерной физике. Физикам-ядерщикам проще всего создать вещество и антивещество с помощью гамма-лучей высокой энергии. На рис. 14.10 показано, как в определенных условиях гамма-квант может самопроизвольно превратиться в частицу и античастицу вещества. Этот процесс возможен, если гамма-квант обладает достаточно большой энергией – большей, чем энергия (в том числе связанная с массой) рожденных частиц. В понятии антивеществ нет ничего таинственного. В подобном процессе *рождения пар* всегда в одинаковых количествах возникают частицы и античастицы.

Изучая рождение пар, физики-теоретики обнаружили, что лишенное частиц пространство – *вакуум* – очень удобно представлять себе заполненным воображаемыми, или *виртуальными*, парами частиц. Например, точку в пустом пространстве можно представить в виде виртуального электрона, «сидящего» на воображаемом позитроне. Другую точку можно мыслить в виде воображаемого протона, «сидящего» на воображаемом антипротоне. В каждом подобном случае влияние виртуальной частицы полностью компенсируется влиянием виртуальной античастицы. Однако, когда падающий извне мощный гамма-квант соударяется с виртуальной парой, эти воображаемые частицы могут поглотить из него столько энергии, что масса-энергия излучения перейдет в массу-энергию вещества согласно знаменитой форму-

ле $E = mc^2$, и эти частицы появляются в реальном мире. Поэтому процесс рождения пар можно понимать как поглощение виртуальными парами частиц энергии, которая их превращает в реальные. Представление о том, что пустое пространство состоит из виртуальных пар, способных стать реальными, оказалось весьма полезным в ядерной физике.

Задумайтесь на минуту о том, что происходит вблизи пространственно-временной сингулярности в черной дыре. В сингулярности искривление пространства-времени бесконечно сильно, а это приводит к бесконечно сильным приливным напряжениям. Все, что падает на сингулярность, разрывается на части этими непреодолимыми напряжениями: в непосредственной близости от сингулярности приливные силы чудовищно велики. Вблизи сингулярности всегда можно отыскать такую точку, в которой приливные силы достаточно велики, чтобы разрушить любой наперед взятый объект. Рассмотрим, в частности, пустое пространство (вакуум) на расстоянии в доли миллиметра вблизи сингулярности. Хотя это пространство и пустое, его можно представить себе как содержащее виртуальные пары частиц и античастиц. Совсем рядом с сингулярностью приливные силы окажутся настолько сильными, что *оторвут друг от друга частицы и античастицы в виртуальных парах.* Тяготение окажется настолько сильным, что виртуальные электроны оторвутся от виртуальных позитронов, а виртуальные протоны – от виртуальных антипротонов. Расчеты показывают, что процесс разрывания виртуальных пар оказывается настолько мощным, что каждая виртуальная частица получает энергию, достаточную для того, чтобы превратиться в реальную! Приливные силы бесконечно сильно искривленного пространства-времени вблизи сингулярности буквально *рвут на части пространство-время*, порождая при этом вещество и антивещество. Таким образом, из сингулярности извергаются потоки вещества и антивещества! Подобно тому как мощный гамма-квант порождает частицы и античастицы, мощное гравитационное поле вблизи сингулярности тоже порождает частицы и античастицы.

Если сингулярность пространственноподобна и находится в будущем, то частицам и античастицам некуда из нее деваться. Однако как показано на рис. 14.11, если сингулярность временноподобна или находится в прошлом, то вещество и антивещество *могут* уйти от нее: существуют такие временноподобные мировые линии, вдоль которых *ускользают* рожденные частицы и античастицы.

Предсказание этого замечательного явления, впервые сделанное в блестящих теоретических работах Стивена У. Хоукинга, приводит к ряду важных выводов. Если в шварцшильдовской дыре могла возникнуть сингулярность прошлого, то она вскоре

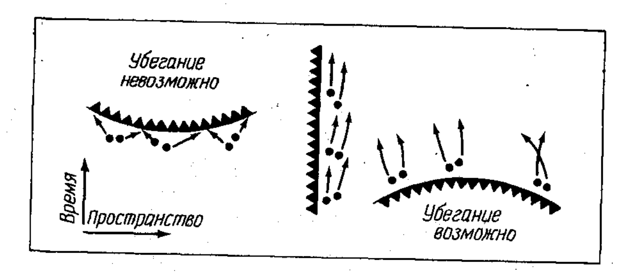


РИС. 14.11.

Рождение пар вблизи сингулярности. Чудовищные приливные силы вблизи сингулярности буквально разрывают на части пространство-время, приводя тем самым к рождению пар частиц и античастиц. Возникающие пары могут уходить от сингулярности, если она временноподобна или если она пространственноподобна и находится в прошлом.

«разорвала» бы около себя пространство-время и заполнила дыру веществом и антивеществом. В дырах Райснера–Нордстрёма и Керра, где сингулярности временноподобны, порождаемые ими пары также смогли бы уйти от сингулярности. Такой процесс рождения пар поэтому быстро заполнил бы диаграмму Пенроуза для заряженных и вращающихся дыр.

Итак, придется оставить надежды! Чтобы путешествия в другие Вселенные оказались возможными, сингулярности дыры должны быть временноподобными. Чтобы существовали белые дыры, сингулярности должны находиться где-то в прошлом. Во всех подобных случаях такие сингулярности приведут к рождению огромного количества вещества и антивещества, которое

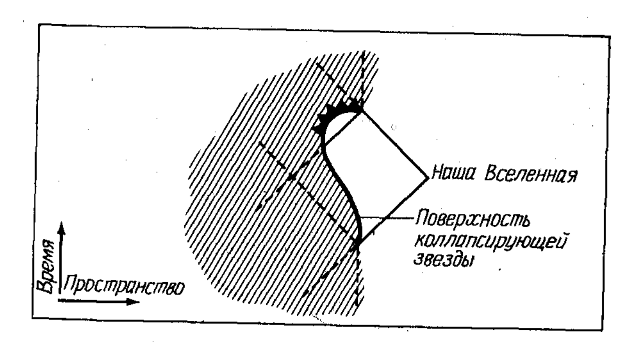


РИС. 14.12.

Диаграмма Пенроуза для реальной черной дыры. Рождение пар вблизи сингулярности и неустойчивость голубых слоев совместно приводят к отбрасыванию большей части идеализированной диаграммы Пенроуза. По-видимому, образуется лишь сингулярность будущего, которая в общем пространственноподобна, что исключает возможность машины времени или путешествия в другие Вселенные.

быстро заполнит дыры, тем самым исключая возможность всех чересчур необычных явлений. Неустойчивость фиолетовых слоев и рождение пар вблизи сингулярности устраняют бóльшую часть деталей картины на диаграмме Пенроуза. Хотя еще не было проделано подробных расчетов, диаграмма Пенроуза для реальной вращающейся или заряженной черной дыры, вероятно, выглядит так, как на рис. 14.12.

Изложенные теоретические результаты середины 1970-х годов могут быть восприняты как жестокое разочарование каждым, кто любит пофантазировать о машинах времени и космических путешествиях в другие Вселенные. Но часто научное открытие, опрокидывающее один круг идей, дает начало совершенно новым представлениям. И действительно, как мы увидим в заключительной главе, процесс рождения пар в сильных гравитационных полях приводит к тому, что некоторые типы черных дыр должны испаряться и взрываться!

15

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ЛИНЗЫ

Общая теория относительности – это, несомненно, наилучший из известных сегодня в физике способов описания тяготения. Согласно этой теории, гравитационное поле любого объекта проявляется в искривлении пространства-времени. Поскольку все виды материи порождают гравитацию, то любое материальное тело в той или иной мере влияет на геометрию пространства-времени. И чем сильнее гравитационное поле этого тела, тем бóльшим искривлением характеризуется геометрия.

Представим себе какие-либо тела, движущиеся в пространстве. Поскольку каждое из них имеет массу, то вместе с телом перемещается и порожденное им небольшое искривление пространства-времени. Таким образом, когда тела движутся, геометрия пространства-времени меняется. Всякий раз, когда изменяется положение тел, геометрия должна «приспосабливаться» к новой ситуации. Этот процесс приспособления проявляется в виде «ряби» на общем фоне геометрии пространства-времени. Такая рябь разбегается во все стороны от источников тяготения со скоростью света, и ее называют *гравитационными* волнами.

Гравитационные волны возникают почти при всяком перемещении материи. Все вызывает излучение гравитационных волн – и скачущий мячик, и машущий руками человек, и Луна, обращающаяся вокруг Земли. Как правило, тела, создающие сильные гравитационные поля, способны испускать более мощные гравитационные волны, чем тела со слабыми гравитационными полями. Гипотетическая двойная система, состоящая из двух черных дыр, дает при взаимном обращении компонентов намного более сильное гравитационное излучение, чем Юпитер при своем движении вокруг Солнца в Солнечной системе. В табл. 15.1, основанной на расчетах Брагинского, Руффини и Уилера, приведена мощность излучения двойных систем разных типов. Для сравнения вспомним, что мощность, излучаемая Солнцем в форме света, составляет 400 000 квадриллионов (10^{15}) мегаватт.

Из табл. 15.1 видно, что короткопериодические двойные, как правило, излучают более мощные гравитационные волны, чем двойные с большим периодом обращения. В короткопериодичес-

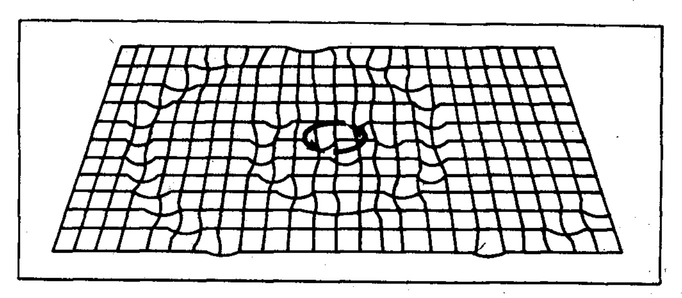


РИС. 15.1.

Гравитационные волны от двойной звезды. Как показано на этой схеме, система двух звезд, обращающихся вокруг друг друга, испускает гравитационные волны. Если звезды находятся очень близко друг к другу и движутся по своим орбитам очень быстро, то система может испускать значительную мощность в виде гравитационных волн.

ставим себе кольцо, образованное электронами, свободно взвешенными в пространстве. Если через это кольцо проходит электромагнитная волна, то все электроны в унисон начнут колебаться взад и вперед. Если же через кольцо проходит гравитационная волна, то частицы приходят в движение относительно друг друга. Как видно из рис. 15.2, при этом искажается форма кольца – оно сплющивается или вытягивается.

Такое *деформирующее* воздействие гравитационных волн подсказывает метод, с помощью которого оказалось бы возможно их зарегистрировать. Представим себе крупное тело – скажем ме-

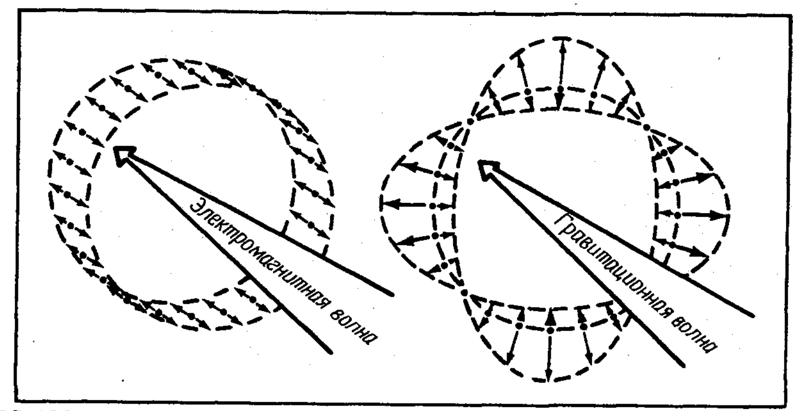


РИС. 15.2.

Сравнение электромагнитных и гравитационных волн. Когда электромагнитная волна проходит через кольцо, образованное электронами, свободно парящими в пространстве, все эти электроны в унисон колеблются взад и вперед. Но когда через кольцо частиц проходит гравитационная волна, искажается форма этого кольца, ибо частицы приходят в движение относительно друг друга.

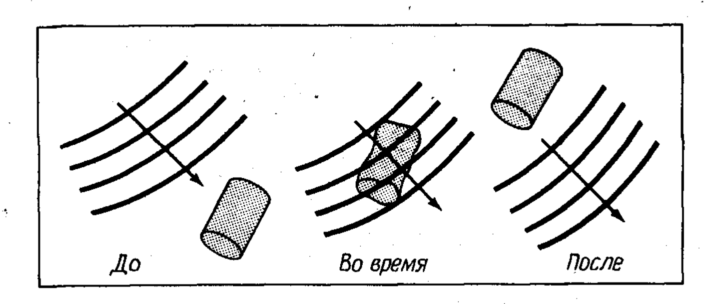


РИС. 15.3.

Влияние гравитационных волн на объект. Когда гравитационные волны проходят через какой-нибудь объект, они искажают его форму (очень немного).

таллический цилиндр, изображенный на рис. 15.3. Когда гравитационного излучения нет, цилиндр обладает определенной исходной формой. Но когда через него проходит гравитационная волна, он деформируется. Разумеется, под действием гравитационной волны форма цилиндра изменится совсем немного. Но если удастся заметить такое небольшое изменение, то это значит, что физики научились конструировать *гравитационную* антенну.

Первая попытка построить подобную гравитационную антенну была предпринята Джозефом Вебером из Мэрилендского университета (США) (рис. 15.4). Еще в 1950-е годы Вебер решил попробовать поработать с большим алюминиевым цилиндром. Понимая, что речь идет о необходимости регистрировать невероятно малые изменения формы цилиндра, исследователь наклеил на поверхность цилиндра пьезоэлектрические датчики деформации. Пьезоэлектрические кристаллы обладают чрезвычайно высокой чувствительностью и дают заметный электрический ток даже при воздействии ничтожных давлений или натяжений. Полученные электрические сигналы усиливались и регистрировались электронной аппаратурой в лаборатории Вебера.

Идея, положенная в основу эксперимента, очень проста. Всякий раз, когда через веберовский цилиндр проходит гравитационная волна, цилиндр начинает колебаться. Колебания стержня передаются пьезоэлектрическим датчикам, электрический ток от которых идет в усилитель и к регистрирующему устройству. Однако практическая реализация эксперимента чрезвычайно сложна. Если на улице бушует гроза или просто кто-то идет по лестнице в помещение лаборатории, то возникают механические вибрации, вполне достаточные, чтобы на нее прореагировали пьезоэлектрические датчики. Таким образом, перед Вебером встала задача отделить настоящие гравитационные волны от «шумов», обусловленных многочисленными посторонними причинами.

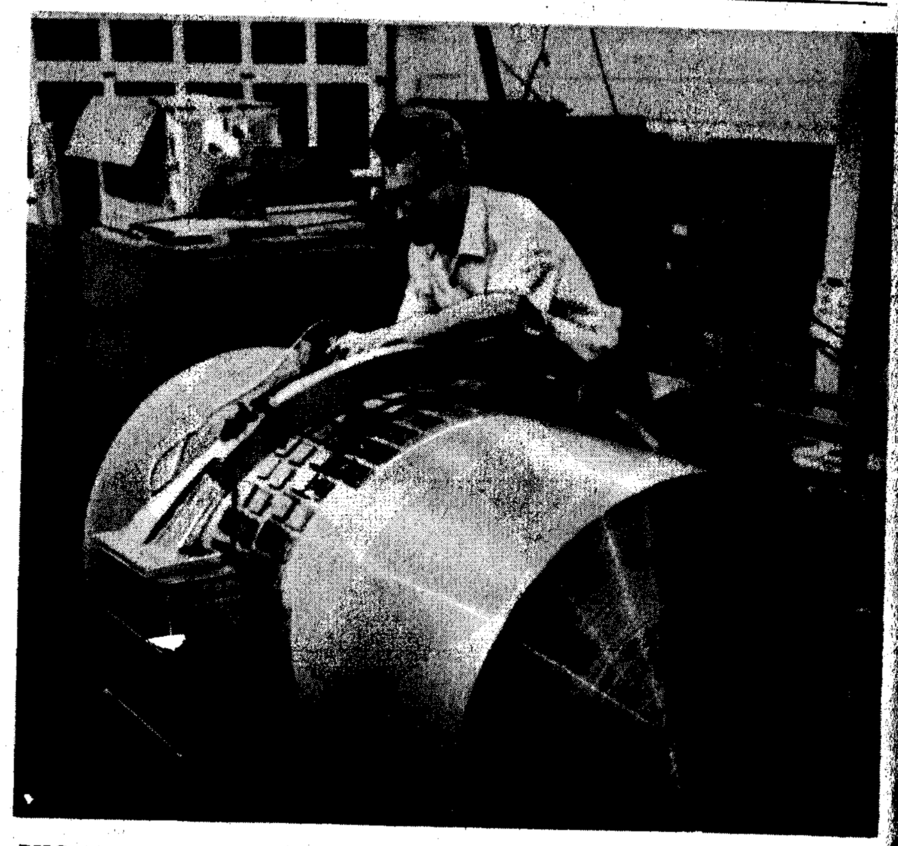


РИС. 15.4.
Гравитационная антенна. Вы видите здесь Вебера, наклонившегося над одной из своих антенн. Антенна представляет собой большой алюминиевый цилиндр, колебания которого регистрируются с помощью очень чувствительных кварцевых кристаллов, наклеенных на его поверхность. (С разрешения Джозефа Вебера.)

В 1960-х годах Вебер установил две гравитационные антенны – одну в Мэрилендском университете близ Вашингтона, а другую – в Аргоннской национальной лаборатории под Чикаго. Каждый цилиндр был длиной около полутора метров и диаметром 60 см, а весил почти полторы тонны. Как и ожидалось, пьезоэлектрические кристаллы на каждом из стержней все время подавали сигналы, ибо стержни отвечали колебаниями на всевозможные случайные возмущения. Однако Вебер понимал, что очень маловероятно такое стечение событий, когда два случайных воздействия проявятся одновременно и в Вашингтоне, и в Чикаго. Поэтому все его внимание было сосредоточено на

совпадениях. Когда на Землю приходит гравитационная волна из космоса, обе антенны Вебера должны прийти в колебательное движение в основном одного и того же типа и в одно и то же время. Отбрасывая случайные колебания, которые *не возникают* одновременно в Мэриленде и в Аргонне, он тем самым смог бы исключить «шумы» (рис. 15.5).

После многих лет упорного труда Веберу наконец удалось зарегистрировать одновременные колебания его обеих антенн. К 1968 г. установка была настолько усовершенствована, что совпадения сигналов в антеннах в Мэриленде и Чикаго наблюдались почти ежедневно. Вебер привел доводы, свидетельствующие в пользу того, что вероятность чисто случайной природы этих совпадений крайне мала, и пришел поэтому к заключению, что действительно смог обнаружить гравитационные волны. К тому же использованные в его экспериментах антенны обладали некоторой направленностью: они лучше должны были воспринимать гравитационные волны, приходящие с определенных направлений на небе. Обращая внимание на время суток, в которое была зарегистрирована бо́льшая часть совпадений, Вебер предположил, что зарегистрированное им гравитационное излучение могло бы приходить из центра нашей Галактики.

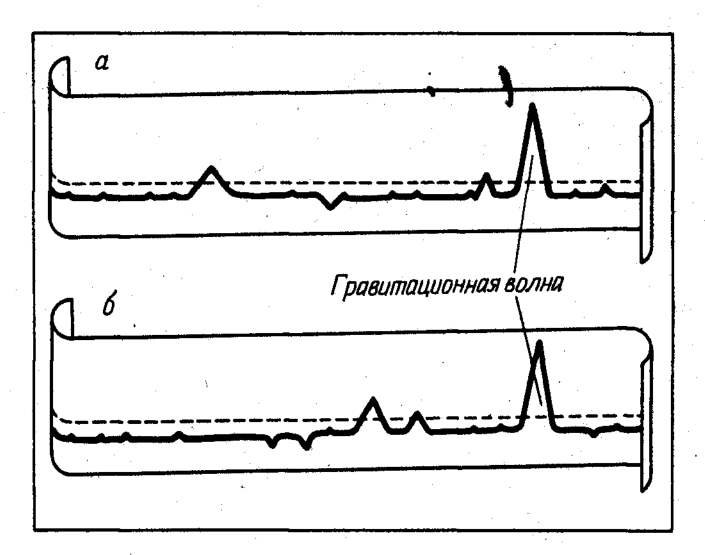


РИС. 15.5.
Регистрация гравитационных волн. Гравитационные антенны, расположенные в Мэрилендском университете и Аргоннской национальной лаборатории, постоянно отмечают сигналы, отвечающие случайным воздействиям. Но сильный сигнал, *одновременно* принятый обеими антеннами, может быть вызван приходом гравитационной волны.

Тот факт, что Веберу действительно удалось обнаружить гравитационные волны, энергично оспаривается многими физиками. Для сомнений существуют две веские причины. Прежде всего в последние годы уже несколько групп физиков соорудили гравитационные антенны, но им практически ничего не удалось зарегистрировать. Значит, либо Вебер ошибается и его совпадения случайны или вызваны каким-то посторонним влиянием, либо те физики, которые построили новые антенны, еще не смогли так усовершенствовать свою аппаратуру, чтобы регистрировать те волны, о наблюдении которых сообщал Вебер.

Вторая причина выявляется из некоторых любопытных расчетов. Мы уже отмечали, что гравитационные волны очень слабы и по сравнению с другими формами излучения они переносят очень мало энергии. Именно поэтому их так трудно обнаружить. Однако если Вебер *на самом деле* зарегистрировал приход гравитационных волн от центра нашей Галактики, то можно оценить энергию, которая затрачивалась бы там, в галактическом центре, для излучения этих волн. Значительные по амплитуде гравитационные волны могли бы быть вызваны, например, колебаниями нейтронных звезд или черных дыр, падением больших масс вещества на черную дыру, столкновениями двух черных дыр и вспышками сверхновых. Чтобы эти процессы (или им подобные) давали мощность, необходимую для возбуждения наблюдаемых Вебером колебаний в его антеннах, в центре нашей Галактики должны происходить чудовищные по своим масштабам катастрофы. К тому же, поскольку Вебер утверждает, что он регистрирует ежедневно по нескольку совпадений, эти чудовищные катастрофы должны там происходить *каждые несколько часов*. Астрофизики считают практически невозможным вообразить себе физические условия, при которых могли бы столь часто происходить явления, вызывающие такое мощное гравитационное излучение.

Хотя и неправдоподобно, чтобы в центре нашей Галактики сверхновые взрывались каждые несколько часов, да к тому же по нескольку раз в день сталкивались черные дыры, там могли бы реализоваться и другие механизмы, еще не известные исследователям. На первый взгляд процессы, при которых могли бы генерироваться веберовские гравитационные волны, должны направлять энергию одинаково по всем направлениям, а ведь наша Земля настолько мала, что на нее попадает лишь очень малая доля энергии гравитационных волн, высвобождающейся при этих процессах. Именно поэтому астрофизики утверждают, что подобные процессы *должны быть* чудовищно мощными. Однако если энергия каким-то образом *фокусируется* на Землю, то уже намного менее мощные процессы смогли бы объяснить наблюдения Вебера.

Выше мы уже отмечали, что черные дыры в двойных системах могли бы испускать намного более интенсивное гравитационное излучение, чем обращающиеся вокруг друг друга обычные звезды. Хотя почти невероятно, чтобы существовали двойные системы, состоящие из черных дыр, последние могли бы иногда в ходе своих движений в Галактике проходить очень близко друг к другу. Центр Галактики – это, наверное, самое естественное место для таких близких встреч черных дыр, ибо там звезд больше, чем где-либо еще в нашей звездной системе. И всякий раз, когда две черные дыры проходят в нескольких километрах друг от друга, их взаимодействие вызывает резкую вспышку гравитационного излучения. Но что еще более важно, возникающие гравитационные волны при этом *фокусируются*. Черная дыра искривляет пути распространения гравитационных волн точно так же, как она искривляет лучи света. При этом черная дыра может фокусировать излучение (как электромагнитное, так и гравитационное) в определенном направлении, в результате чего удаленный наблюдатель будет регистрировать необычайно интенсивные вспышки энергии. Такое свойство черной дыры фокусировать излучение делает ее *гравитационной линзой*.

В середине 1970-х годов Торн и Ковач из Калифорнийского технологического института приступили к исследованию возможности гравитационной фокусировки гравитационных волн, испускаемых почти сталкивающимися друг с другом черными дырами. Хотя их расчеты еще не закончены, мысль о том, что гравитационные волны могут случайно фокусироваться в направлении на Землю при таких «почти-столкновениях», кажется весьма интересной. Возможно, фокусировка – это тот самый механизм, который приводит к появлению волн, зарегистрированных Вебером с помощью его антенн.

Гравитационные линзы представляют и самостоятельный интерес независимо от их возможной связи с фокусировкой гравитационных волн. Сразу же после первого предположения о существовании черных дыр стало ясно, что кривизна пространства-времени вокруг черной дыры должна приводить к сильному отклонению лучей света. При определенных условиях проходящие мимо черной дыры лучи света могут отклоняться таким образом, что удаленные объекты будут казаться более яркими, чем обычно, а могут наблюдаться и их множественные изображения. Как показано на рис. 15.6, если черная дыра расположена между наблюдателем и удаленным источником света, может происходить фокусировка этого света. Теоретически гравитационная линза будет давать бесконечное число изображений удаленных звезд и галактик. Практически же будут видимы лишь *первичные* и *вторичные* изображения – остальные окажутся слишком слабыми.

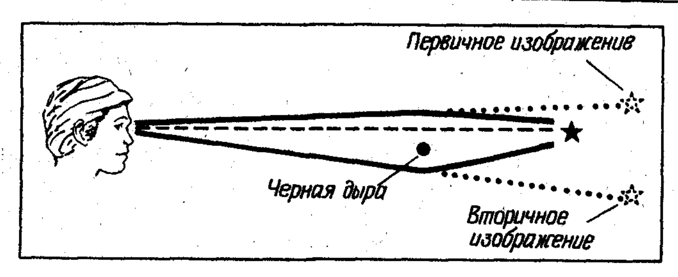


РИС. 15.6.
Гравитационная линза. Черная дыра отклоняет и фокусирует лучи света от удаленной звезды. Бóльшая часть отклоненного света собирается в *два* изображения этой звезды.

Поскольку наблюдение многократных изображений одного и того же объекта равнозначно убедительному свидетельству в пользу существования черной дыры, ряд астрофизиков проделали трудоемкие расчеты яркости и формы изображений, которые дают гравитационные линзы. В частности, Р. Ч. Уэйт в 1974 г. в Имперском колледже (Лондон) опубликовал изображения галактики, получаемые при наблюдении «через» гравитационную линзу. Обычное изображение галактики без искажений приведено слева на рис. 15.7. Если черная дыра расположена между Землей и далекой галактикой, то будут наблюдаться два изображения галактики. К тому же оба изображения будут заметно искажены. И чем ближе черная дыра находится к прямой, соединяющей Землю и галактику, тем значительнее окажется искажение.

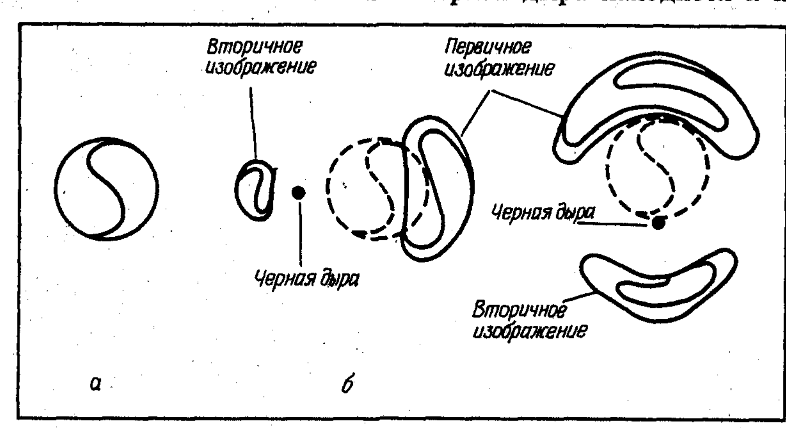


РИС. 15.7.
Вид галактики «сквозь» гравитационную линзу. На этой схеме *слева* показано, как выглядит (без искажений) обычная спиральная галактика. Если между Землей и этой галактикой находится черная дыра, астрономы увидят два изображения. Чем ближе черная дыра к прямой, соединяющей Землю и галактику, тем сильнее будет искажение возникающих изображений. (По Р. Ч. Уэйту.)

Астрономы никогда не наблюдали изображений галактик, которые были бы похожи на полученные Уэйтом. Может быть, дело в том, что для заметной гравитационной фокусировки требуется исключительно точное расположение в пространстве Земли, черной дыры и удаленной галактики на одной прямой. Вероятность того, что такое сочетание (почти) в точности выполнено, крайне мала.

Хотя открытие гравитационных линз еще впереди, уже можно сделать некоторые важные заключения. Астрономы наблюдают с помощью мощных телескопов множество галактик, разбросанных по всему небу. У галактик имеется тенденция группироваться в *скопления*, которые наблюдаются во всех свободных для распространения света областях неба, где отсутствует поглощающее вещество (рис. 15.8). Если существуют *сверхмассивные черные дыры*, т. е. если во Вселенной есть черные дыры, массы которых равны миллиардам солнечных масс, то они должны значительно исказить общий вид неба. Если где-то во Вселенной находится сверхмассивная черная дыра, она существенно повлияет на изображения находящихся за ней галактик. Так как скопления галактик разбросаны по небу достаточно равномерно, можно сделать важный вывод, что сверхмассивных черных дыр *не существует.*

Заметных проявлений эффекта гравитационной линзы можно ожидать в двойных системах, состоящих из черной дыры и видимой звезды. Черная дыра должна отклонять и фокусировать свет от видимой звезды, вызывая тем самым необычные эффекты. В начале 1970-х годов Ч. Т. Каннингэм и Дж. М. Бардин провели интересные расчеты, показавшие, какими должны быть изображения видимых звезд в подобных двойных системах.

Когда релятивистские эффекты отсутствуют, орбита каждой звезды в двойной системе имеет вид эллипса (рис. 15.9). Но если один из компонентов – черная дыра, то его влияние на положение изображений видимой звезды оказывается существенным. На рис. 15.10 приведены «видимые» траектории *первичного изображения* видимой звезды при ее обращении около предельной керровской черной дыры ($M = a$). Когда видимая звезда находится перед черной дырой, ее изображение практически остается неискаженным. Однако, когда звезда уходит за черную дыру, бóльшая часть света звезды, который должен был бы наблюдаться земными астрономами, «проглатывается» дырой. Уйти из мощного гравитационного поля черной дыры удается только тем лучам света, которые испускаются видимой звездой под очень большими углами. Поэтому видимая траектория звезды, проходящей за черной дырой, оказывается сильно искаженной.



РИС. 15.8.
Скопление галактик. В любой области неба, свободной для прохождения света, наблюдается множество галактик. Если бы где-нибудь во Вселенной существовала сверхмассивная черная дыра, она значительно исказила бы изображения галактик на большой части неба. Однако такие искажения никогда не наблюдались. (Обсерватория им. Хейла.)

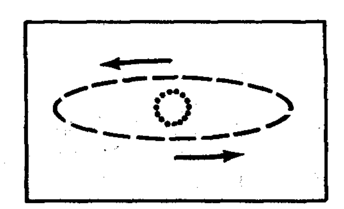


РИС. 15.9.
Обычная двойная система. Когда релятивистские эффекты несущественны, орбита одной звезды вокруг другой в двойной системе должна быть эллипсом.

Вдобавок к только что описанному первичному изображению земные астрономы смогут увидеть и вторичные изображения. Движение вторичного изображения видимой звезды показано на рис. 15.11. Чтобы было удобнее сравнивать, здесь же штриховой линией дана и траектория первичного изображения. В случае вторичных изображений лучи света от видимой звезды перед тем, как уйти к удаленному наблюдателю, описывают оборот вокруг черной дыры. Если вращение черной дыры сравнительно мало влияет на первичное изображение, то оно сильно сказывается на положении вторичных изображений. Когда видимая звезда в действительности находится перед вращающейся черной дырой, вторичное изображение должно наблюдаться слева от нее. При движении звезды вокруг черной дыры (пусть для земного наблюдателя оно будет происходить против часовой стрелки) вторичное изображение также будет обращаться вокруг места, где расположена черная дыра, и тоже против часовой стрелки. Однако, когда будет пройдено 3/4 пути по орбите и видимая звезда станет выходить из-за черной дыры, произойдет нечто совершенно необычное. Возникнет *новое* вторичное изображение.

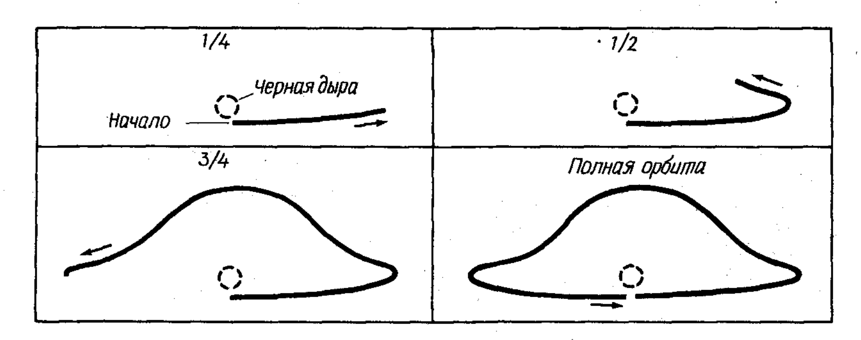


РИС. 15.10.
Движение первичного изображения. На этой последовательности схем представлено движение первичного изображения видимой звезды при обращении ее вокруг вращающейся черной дыры. Когда видимая звезда находится перед черной дырой, изображение почти не испытывает смещения. Однако когда видимая звезда проходит за черной дырой, мимо нее удается проскользнуть только тем лучам света, которые покинули звезду под большими углами. (По Ч. Т. Каннингэму и Дж. М. Бардину.)

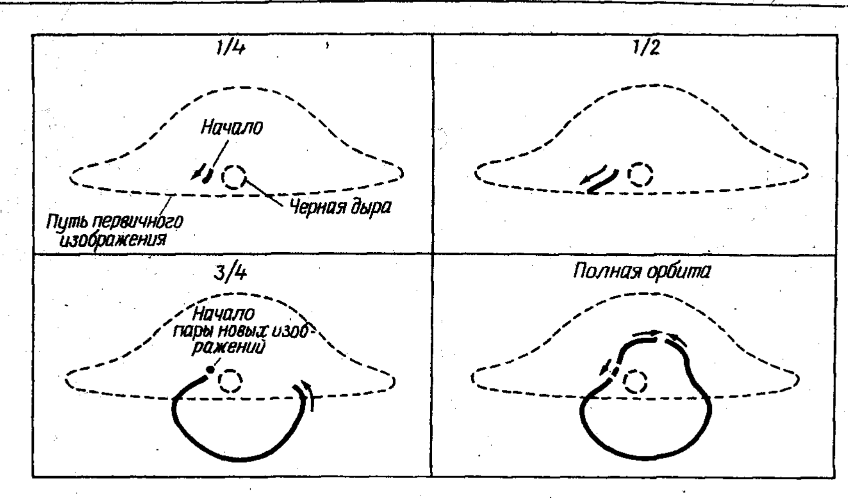


РИС. 15.11.

Движение вторичных изображений. Лучи света, совершающие один оборот вокруг черной дыры до того, как уйти к удаленному астроному, дают вторичные изображения. Ввиду вращения черной дыры наблюдается несколько таких вторичных изображений. (По Ч. Т. Каннингэму и Дж. М. Бардину.)

Это новое изображение разделится на два. Одно станет двигаться против часовой стрелки, завершая оборот по орбите, другое же пойдет по часовой стрелке и встретится с первоначальным вторичным изображением. Такие множественные вторичные изображения возникают вследствие вращения черной дыры. Мировая линия при обороте в одну сторону вокруг черной дыры отличается от мировой линии при движении в другую сторону вокруг нее. Различие между траекториями обращения лучей света в прямую и в обратную стороны вокруг керровской черной дыры приводит к возникновению нескольких вторичных изображений.

Разумеется, у видимой звезды будут изображения и более высоких порядков. Лучи света, сделавшие два, три или четыре оборота вокруг черной дыры, дадут сложную систему изображений. Однако бо́льшая часть всего излучения видимой звезды будет сконцентрирована лишь в первичном и вторичных изображениях, так что изображения высших порядков будут исключительно слабыми.

Чтобы гравитационная фокусировка в поле черной дыры играла достаточно существенную роль, черная дыра и видимая звезда, образующие двойную систему, должны наблюдаться на небе близко друг к другу. Далее, Земля, черная дыра и видимая звезда должны находиться почти на одной прямой. Однако если черная дыра и видимая звезда находятся близко друг от друга, то крайне маловероятно, чтобы астроном вообще мог увидеть,

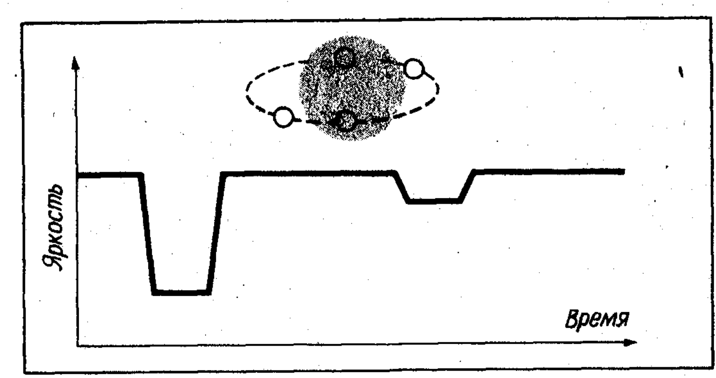


РИС. 15.12.

Затменная двойная система. Если двойная система ориентирована таким образом, что одна звезда время от времени проходит перед другой, полное количество света, испускаемое системой в нашу сторону, периодически убывает. Даже если астрономы, как это часто бывает, не могут увидеть по отдельности звезд в такой затменной двойной системе, характерная форма *кривой блеска* выдает наличие двух звезд.

как движутся около друг друга отдельные изображения. Эти изображения окажутся столь близкими друг к другу, а их перемещения будут такими незначительными, что даже в самые мощные телескопы вся система будет выглядеть как одно неподвижное пятно. Поэтому вряд ли астрономам когда-либо удастся открыть черную дыру по необычному поведению видимой звезды в двойной системе. Однако существует и другой эффект, позволяющий питать некоторые надежды.

До сих пор мы рассматривали расположение различных изображений при обращении видимой звезды вокруг черной дыры. При орбитальном движении эти изображения меняются по яркости. Учтя полную яркость всех изображений вместе взятых, Каннингэм и Бардин обнаружили, что через определенные промежутки времени яркости изображений будут складываться. По

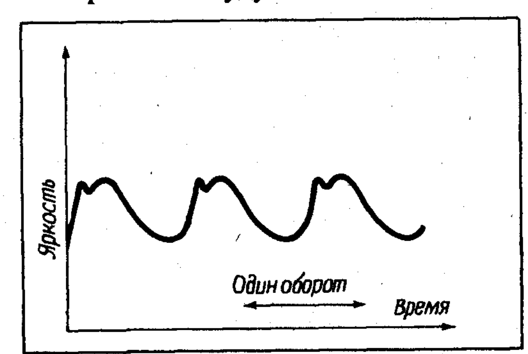


РИС. 15.13.

Кривая блеска для двойной системы, включающей черную дыру. Фокусирующее действие черной дыры, входящей в двойную систему, должно давать пики на соответствующей кривой яркости.

Многие из объектов *Каталога Мессье* находятся сравнительно близко от нас. Подобно туманности Ориона, Крабовидной туманности и Кольцеобразной туманности, они часто бывают связаны с процессами рождения и смерти звезд. Расположены они также среди звезд и находятся поэтому на обычных для звезд расстояниях от нас. Такие объекты разбросаны по всей нашей Галактике.

Хотя многие из объектов Каталога Мессье представляют собой действительно облака газа или скопления звезд, находящиеся в пространстве нашей Галактики, несколько десятков заметно отличаются от них. Эти необычные объекты имеют нередко форму колеса с закрученными спицами и были названы поэтому *спиральными туманностями*. Характерный пример – объект М 101, изображенный на рис. 16.1. Этим спиральным туманностям предстояло стать предметом самых горячих споров в астрономии со времен Коперника.

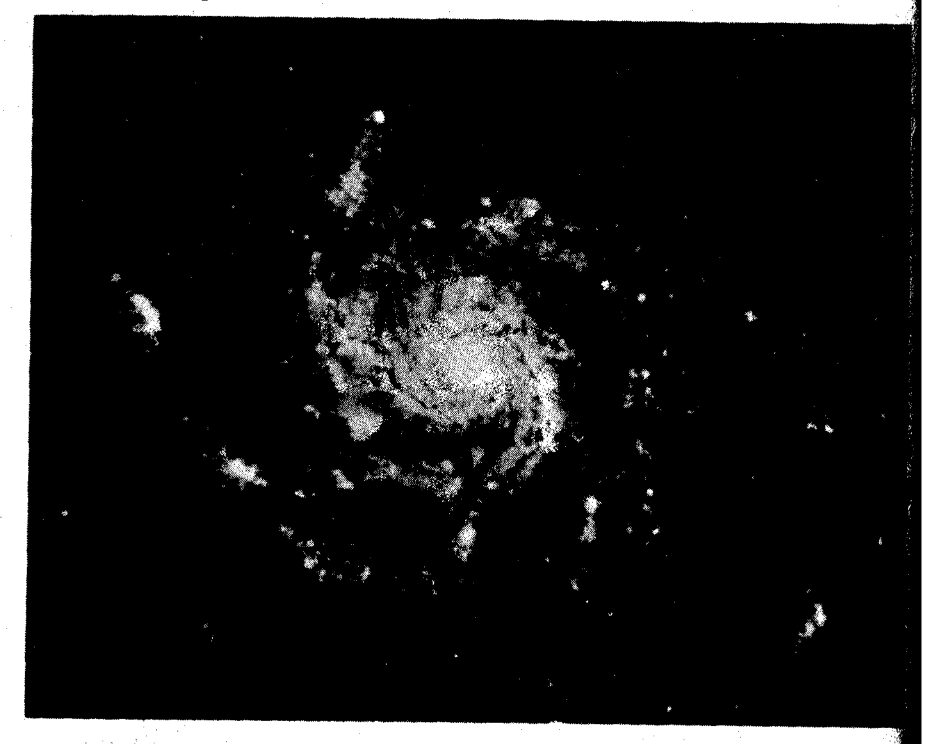


РИС. 16.1.
Одна из галактик. В Каталог Мессье вошли объекты типа этой спиральной галактики (М 101). В начале 1920-х годов астрономы горячо обсуждали вопрос о том, на каких расстояниях от нас находятся галактики. (Ликская обсерватория.)

Главной проблемой оказалось *расстояние* до спиральных туманностей. Являются ли они сравнительно близкими объектами, расположенными на расстояниях всего в сотни или тысячи световых лет от нас? Или это гигантские объекты в миллионах световых лет от Галактики? К началу 1920-х годов астрономы-профессионалы разбились на два враждующих лагеря, и каждый научный конгресс сопровождался горячими спорами по этой проблеме.

К середине 1920-х годов проблема наконец была решена, когда молодой сотрудник обсерватории Маунт Вилсон Эдвин Хаббл сообщил об открытии переменных звезд в нескольких спиральных туманностях, в частности в М 31. М 31 – это большая спиральная туманность в созвездии Андромеды. Часть этой туманности показана на рис. 16.2 (там указаны положения двух переменных звезд в ней). Открытие этих переменных звезд сослужило неоценимую службу, поскольку уже было известно, что период изменения блеска звезд этого типа непосредственно связан с их абсолютной яркостью (светимостью). Измерив период, с которым эти звезды изменяли свою яркость, Хаббл смог найти расстояние до них. Оказалось, что расстояние до М 31 составляет около 2 миллионов световых лет. Туманность Андромеды лежит далеко за пределами нашей Галактики, и это неопровержимо свидетельствует о том, что спиральные туманности – это гигантские звездные системы. Сегодня эти звездные системы называют *спиральными галактиками*.

В конце 1920-х годов Хаббл сделал новые важные открытия, касающиеся природы внегалактических объектов. Во-первых, он нашел, что галактики можно классифицировать по четырем основным типам. Кроме обычных спиральных галактик, таких, как М 31 и М 101, имеются аналогичные объекты, сквозь ядра которых проходит как бы стержень. На рис. 1.4 приведен характерный пример одной из подобных *пересеченных спиральных галактик*.

Кроме спиральных и пересеченных спиральных галактик имеется и третий тип объектов, у которых вообще отсутствуют спиральные рукава. Такие галактики имеют вид эллиптических бесструктурных пятен и называются *эллиптическими галактиками*. Некоторые из самых ярких галактик неба, например М 87 (рис. 16.3), – это эллиптические галактики.

Наконец, те галактики, которые не могут быть причислены ни к одному из трех предыдущих типов (т. е. к спиральным, пересеченным спиральным или эллиптическим), часто обладают необычной формой. Эти странные по своему виду галактики (например, М 82 на рис. 16.4) называются *неправильными галактиками*. К числу неправильных галактик относятся и две самые близкие к нашему Млечному Пути – Малое и Большое Магелла-



РИС. 16.2.
Переменные звезды в галактике М 31. На этом снимке участка галактики Андромеды (М 31, которую обозначают также NGC 224) видны две переменные звезды, отмеченные стрелками. Исследуя свойства переменных звезд, Хаббл сумел доказать, что галактики находятся очень далеко от нашей Галактики. (Обсерватория им. Хейла.)

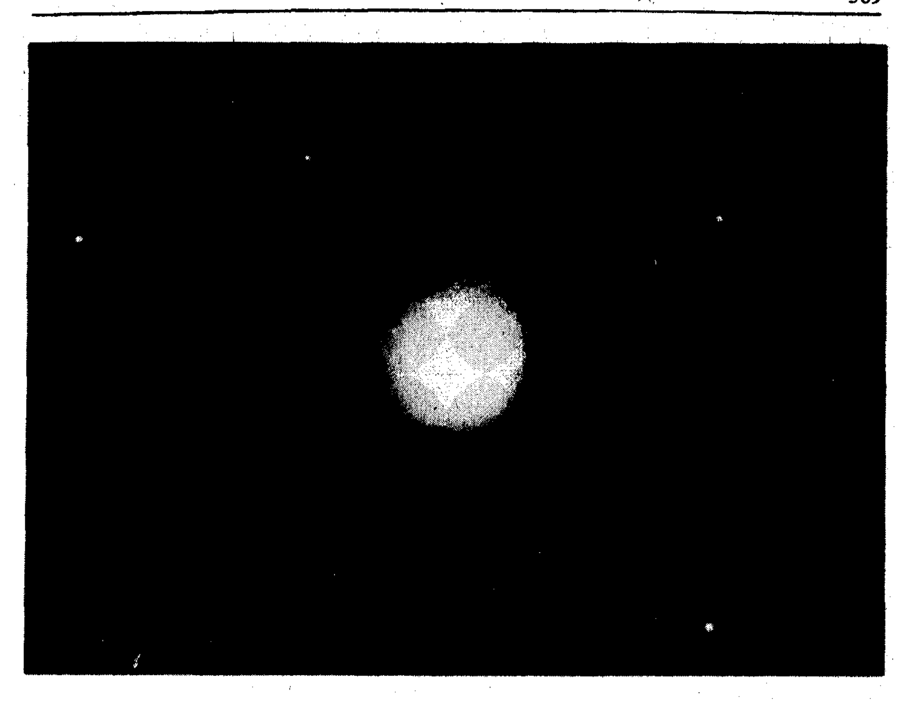


РИС. 16.3.
Гигантская эллиптическая галактика М 87. У многих галактик, как и у этого объекта в созвездии Девы, вообще не наблюдается спиральных рукавов. Такие галактики называют эллиптическими. Эллиптическими являются некоторые из самых ярких галактик неба. (Ликская обсерватория.)

новы Облака, которые можно видеть невооруженным глазом в южном полушарии.

Хаббл не ограничился тем, что создал классификацию галактик по их внешнему виду. Кроме того, он исследовал спектры многих внегалактических объектов. Анализируя спектры далеких галактик, он заметил, что почти во всех этих спектрах наблюдается *красное смещение.* На рис. 16.5 видно, что спектральные линии сдвинуты к красному концу спектра. К 1929 г. Хаббл пришел к выводу, что существует прямая взаимосвязь между красным смещением в спектрах галактик и расстоянием до них. Самые близкие галактики имеют наименьшее красное смещение, т. е. медленно движутся от нас. Более далекие галактики обладают намного бо́льшими значениями красного смещения, а значит, движутся от нас намного быстрее. Эта связь между расстоянием и скоростью разбегания нагляднее всего выражается в форме графика. Он приведен на рис. 16.6 и иллюстрирует *закон Хаббла.*



РИС. 16.4.
Взрывающаяся галактика М 82. Этот объект в созвездии Большой Медведицы является образцом неправильной галактики. Искаженный вид галактики М 82 объясняется тем, что она находится в состоянии взрыва. (Обсерватория им. Хейла.)

Значение закона Хаббла прежде всего состоит в следующем: так как все галактики становятся все дальше и дальше друг от друга, то *наша Вселенная должна расширяться*! К тому же по наклону прямой на рис. 16.6 можно подсчитать, когда именно все галактики должны были находиться в одном и том же месте. Согласно самым последним и самым точным данным (полученным, в частности, в работах Аллана Сэндиджа в обсерватории им. Хейла, США), 18 миллиардов лет назад Вселенная должна была находиться в чрезвычайно сжатом состоянии. Затем по какой-то неизвестной причине произошел колоссальной силы взрыв (его так и называют *Большим Взрывом*), после чего началось расширение Вселенной. Самым непосредственным выводом из фундаментальной работы Хаббла является заключение, что Вселенная расширяется в результате первичного взрыва, происшедшего примерно 18 миллиардов лет назад. Таковы основные элементы теории, которая называется *космологией Большого Взрыва.*

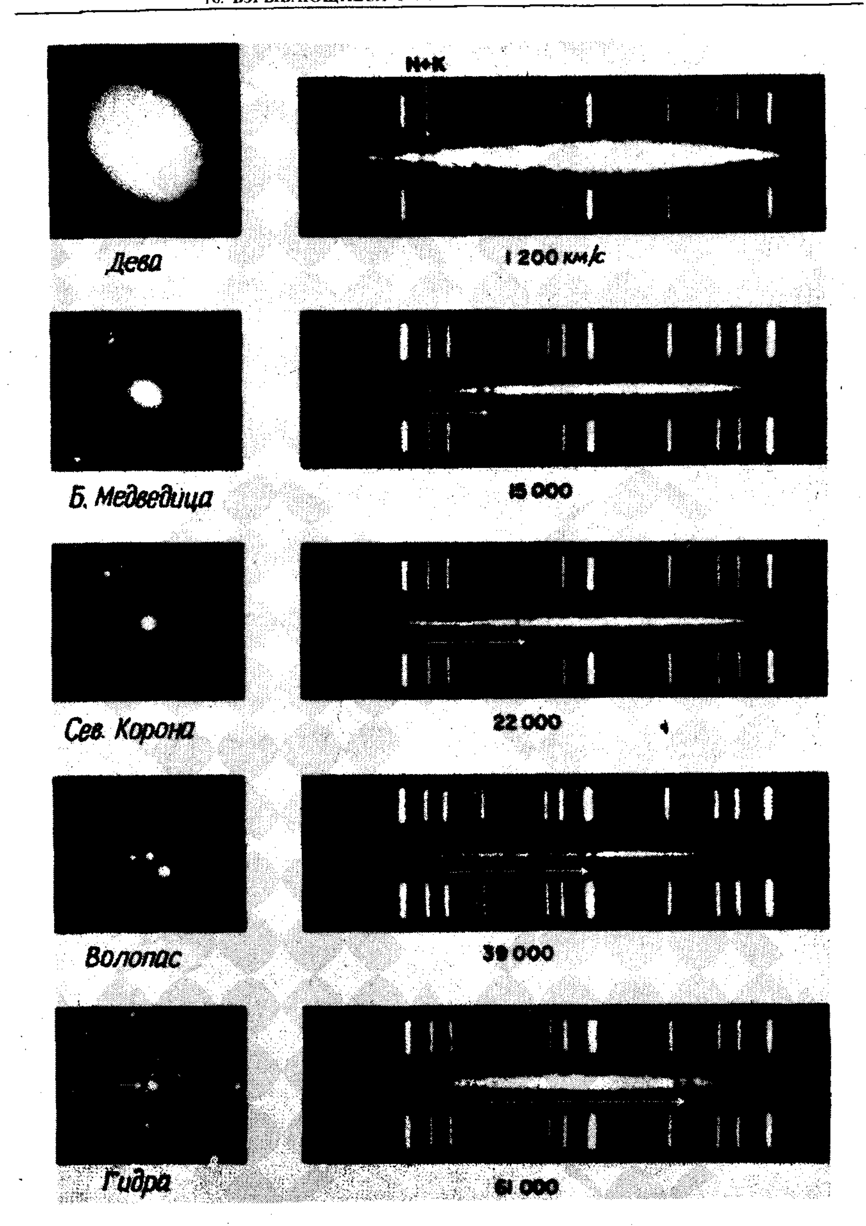


РИС. 16.5.
Красное смещение в спектрах галактик. Здесь приведены фотографии пяти эллиптических галактик и их спектров. Во всех спектрах заметно красное смещение, прямо пропорциональное расстоянию до галактик. Это показывает, что Вселенная расширяется. (Обсерватория им. Хейла.)

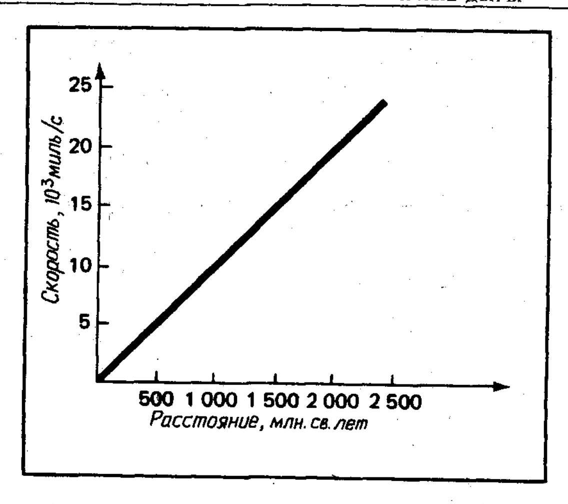


РИС. 16.6.

Закон Хаббла. Существует прямая пропорциональность между скоростями галактик и расстояниями до них. Галактики, расположенные близко от нас, удаляются очень медленно, а более удаленные галактики разбегаются с гораздо большими скоростями. Такая зависимость показывает, что Вселенная расширяется.

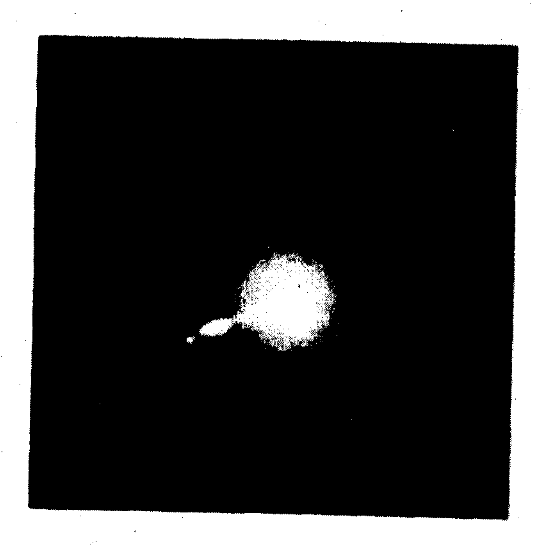


РИС. 16.7.

Струя выброса из галактики М 87. На снимке эллиптической галактики М 87, сделанном с короткой экспозицией (ср. с рис. 16.3), видна гигантская струя газов, извергающаяся из ядра этой галактики. Эта струя является мощным источником радиоизлучения. (Ликская обсерватория.)

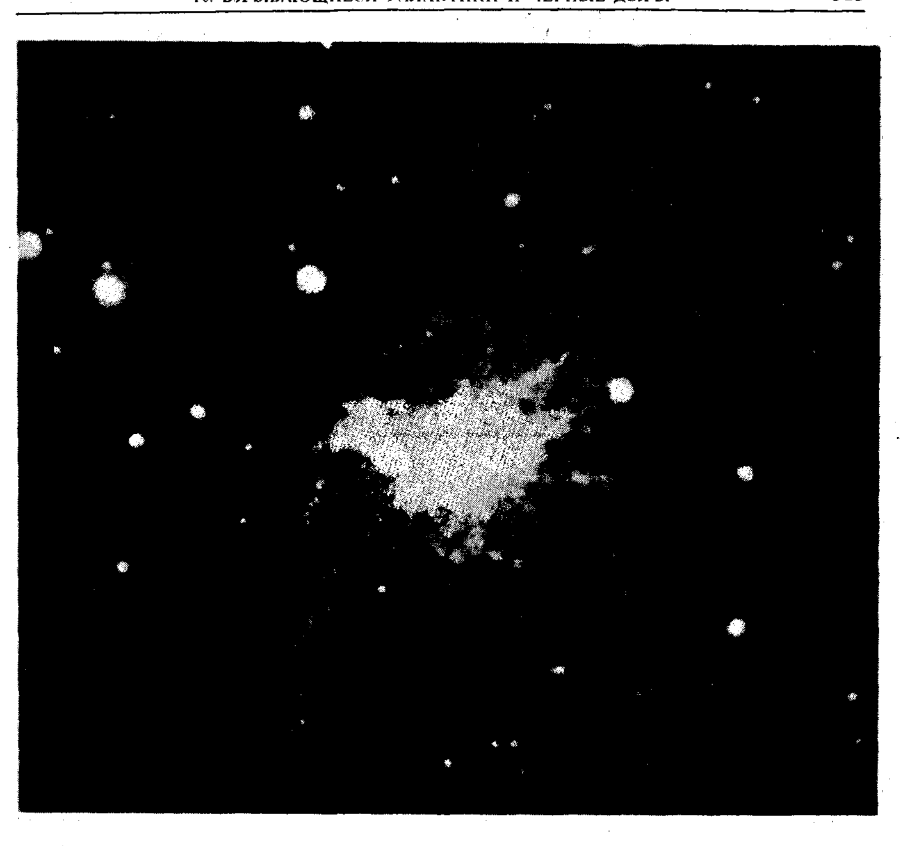


РИС. 16.8.

Взрывающаяся галактика NGC 1275. На этом уникальном снимке видно, как огромные количества газа выбрасываются из галактики NGC 1275 в созвездии Персея. (С разрешения Р. Линдса, Национальная обсерватория Китт Пик.)

В 1960-х годах астрономы приступили к чрезвычайно подробным наблюдениям галактик и, к своему большому удивлению, обнаружили, что в центрах галактик, по-видимому, часто происходят чудовищные катастрофы. Так, например, в неправильной галактике М 82 сейчас наблюдается чудовищный взрыв, буквально разрывающий галактику на части. Струи газа вырываются из этой галактики со скоростями, превышающими 15 000 км/с.

Но кроме неправильных галактик, которые исковерканы катастрофическими явлениями, галактики, имеющие обычный вид, часто также оказываются ареной гигантских взрывов. Например, на снимке с короткой выдержкой на рис. 16.7 видна галактика

М 87, из ядра которой вырывается огромная струя газа. Физики пока не могут объяснить механизмы высвобождения тех количеств энергии, которые должны иметь место в подобных взрывах.

Одним из самых впечатляющих примеров взрывающихся галактик является NGC 1275 в созвездии Персея (сокращение NGC означает «Новый Генеральный Каталог», включающий тысячи туманностей). На рис. 16.8 приведена замечательная фотография этого объекта, полученная Р. Линдсом на Национальной обсерватории Китт Пик (США). Галактика NGC 1275 похожа больше на остатки сверхновой (например, на Крабовидную туманность), чем на галактику. К тому же она является мощным источником радиоизлучения и рентгеновских лучей.

Один из самых мощных радиоисточников южного неба связан с необычной галактикой NGC 5128. Как видно на рис. 16.9, эту галактику также буквально разрывает на части грандиозный взрыв. Процессы, которые приводят к тому, чтобы галактика разрывалась на части, пока совершенно неясны.

Стоящая перед теорией проблема разгадки процессов, приводящих к катастрофическим событиям в ядрах галактик, еще больше усложнилась с открытием квазаров. Квазары (например, 3С 48, изображенный на рис. 16.10)—это голубые звездоподобные объекты, в спектрах которых наблюдаются огромные красные смещения. Есть даже несколько квазаров, красное смещение которых соответствует убеганию со скоростями, превышающими 90% скорости света! Опираясь на закон Хаббла, астрономы заключили в соответствии со значениями красного смещения, что квазары находятся чрезвычайно далеко от нас. Расстояния до них должны быть настолько большими, что они вообще не должны наблюдаться – так они были бы слабы. Но, как и в случае взрывающихся галактик, квазары, по-видимому, излучают фантастические количества энергии, источники которой пока не поддаются объяснению.

В 1969 г. Д. Линден-Белл в Королевской Гринвичской обсерватории (Англия) занялся исследованием квазаров и взрывающихся галактик. Из весьма общих соображений он показал, что, независимо от механизма гигантского выхода энергии в ядрах галактик и в квазарах, источник этой энергии должен быть *компактным* и *массивным*. Как правило, масса объектов, выделяющих такое количество энергии, должна достигать 10 миллионов масс Солнца! А поскольку эти объекты должны иметь малые размеры, логически вытекает, что либо они уже являются черными дырами, либо станут черными дырами за очень короткий промежуток времени. Поэтому Линден-Белл сделал заключение, что с таинственными явлениями во взрывающихся галактиках и квазарах могут быть связаны *массивные черные дыры*.



РИС. 16.9.
Взрывающаяся галактика NGC 5128. При катастрофических процессах, в результате которых эта галактика разрывается на части, также испускается огромное количество радиоволн. Эта видимая в оптическом диапазоне галактика NGC 5128 связана с одним из самых мощных радиоисточников южного неба. (Обсерватория им. Хейла.)

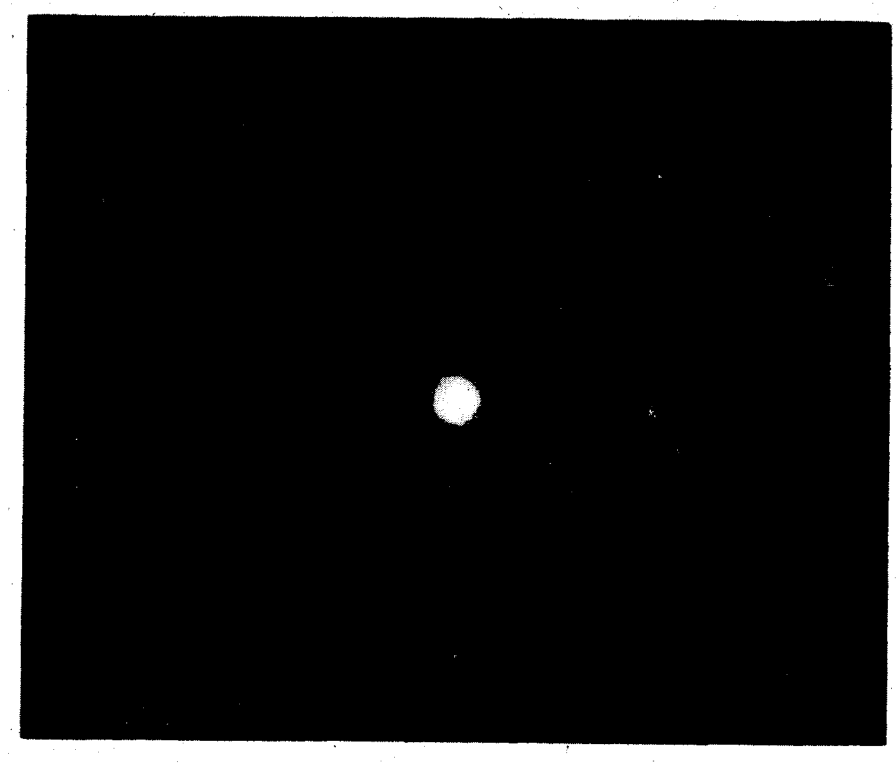


РИС. 16.10.

Квазар 3С 48. Квазары выглядят как голубые звезды, но обладают огромными значениями красного смещения. Согласно закону Хаббла, это означает, что квазары – самые удаленные объекты, наблюдаемые во Вселенной. Будучи столь далеко от нас, они должны излучать огромные количества энергии, чтобы быть видимыми,– намного больше, чем излучают обычные галактики. (Обсерватория им. Хейла.)

Хотя массивные черные дыры, возможно, находятся в центрах галактик, трудно представить себе, как именно могут они выделять те огромные количества энергии, которые наблюдаются. В 1971 г. Линден-Белл и М. Дж. Рис из Кембриджского университета (Англия) показали, что массивная черная дыра в центре нашей Галактики была бы окружена огромным диском аккреции. В отличие от источника Лебедь Х-1, испускающего рентгеновские лучи, галактический диск аккреции должен был бы испускать огромное количество инфракрасного излучения. Любопытно отметить, что усилиями астрономов, в том числе Фрэнка Лоу из Аризонского университета (США), были действительно открыты мощные источники инфракрасного излучения в центре Галактики.

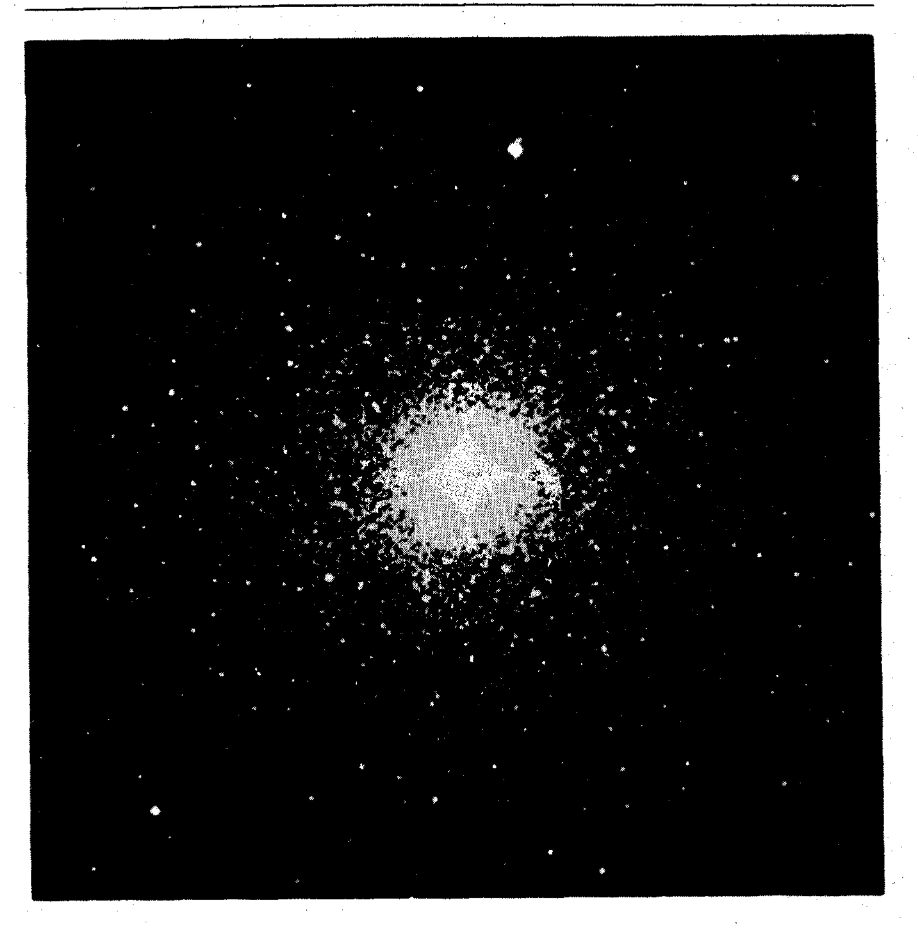


РИС. 16.11.

Шаровое звездное скопление. Шаровые скопления можно обнаружить почти во всякой галактике. Обычно в них содержится порядка 100 000 звезд, и они движутся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам вокруг ядра своей галактики. (Ликская обсерватория.)

Другой канал возможного высвобождения энергии массивными черными дырами – это механизм Пенроуза, обсуждавшийся в гл. 11. Вспомним, что если при падении в эргосфере на керровскую черную дыру тело распадается на части, то часть этого тела может быть выброшена обратно с огромной энергией. Астрономам хорошо известно, что в большинстве галактик имеются *шаровые звездные скопления.* Такие скопления (снимок одного из них приведен на рис. 16.11) обычно содержат около 100 000 звезд и движутся вокруг центра галактики, к которой они принадле-

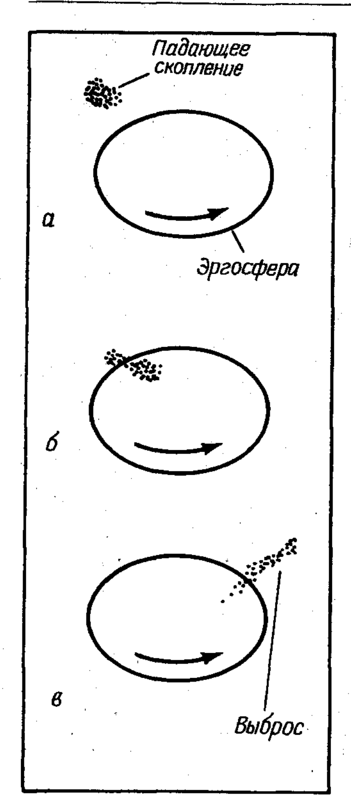


РИС. 16.12.
Просачивание через эргосферу. Если звездное скопление попадает в эргосферу массивной черной дыры, оно разрывается на части. Под влиянием механизма Пенроуза часть звезд может быть выброшена обратно, приобретя огромные скорости.

жат, по очень вытянутым эллиптическим орбитам. Если в центре этой галактики имеется массивная черная дыра, то может случиться, что шаровое скопление случайно попадет в ее эргосферу. В результате скопление разорвется на части, как показано на рис. 16.12. Если часть входящих в него звезд упадет в дыру, то остальные могут быть с большой силой выброшены наружу. Возможно, что такой процесс, именуемый *просачиванием сквозь эргосферу*, и порождает «струю», наблюдаемую в таких галактиках, как M 87 (см. рис. 16.7) или в квазаре 3C 273 (см. рис. 5.8).

Хотя предположение, что в центре галактик находятся массивные черные дыры, привлекательно, следует подчеркнуть, что в поддержку этой гипотезы нельзя привести ни одного прямого факта наблюдений. Однако это не мешает ряду астрофизиков увлекаться довольно фантастическими спекуляциями. Например, была выдвинута еще более фантастическая идея, что многие процессы, наблюдающиеся в галактиках и квазарах, связаны с *белыми дырами*. В гл. 14 были приведены весьма общие соображения, которые как будто полностью исключают возможность суще-

ствования белых дыр. Здесь в первую очередь речь идет о том, что существование белых дыр противоречит некоторым фундаментальным законам, в частности принципу причинности.

В 1975 г. Стивен Хоукинг в Калифорнийском технологическом институте отметил, что все физические законы формулируются на языке пространства и времени. Но именно эти последние понятия теряют смысл на сингулярности, где кривизна становится бесконечно большой. Поэтому в сингулярности теряют смысл и законы физики. Сингулярность пространства-времени не обязана подчиняться известным законам природы, и из «голой» сингулярности вещество и энергия могут истекать совершенно беспорядочно. Из этого удивительного открытия Хоукинга – *принципа беспорядка* – вытекает, что сингулярность должна выглядеть как белая дыра. Наличие в центре галактики «голой» сингулярности могло бы объяснить те таинственные явления, которые были открыты астрономами в последние годы.

В самом начале нашего века астрономы пришли к выводу, что не могут объяснить в рамках известных тогда физических законов, почему светит Солнце. Все говорило о том, что Солнце должно было погаснуть много миллионов лет назад. Лишь после того, как получили развитие частная теория относительности, квантовая механика и ядерная физика, удалось свести концы с концами. Решение загадки источника солнечной энергии пришло только после открытия новых законов физики.

Сейчас перед наукой снова встала трудная проблема. Почти каждый день астрономы открывают в небе объекты, которые излучают энергию в таких количествах, которые как будто невозможно объяснить. Некоторые астрофизики обратились к самым экзотическим объектам, которые только знает сегодняшняя наука,– к массивным черным дырам, белым дырам и «голым» сингулярностям. Может быть, они идут по верному пути, но не исключено, что это лишь напрасная трата сил. История астрономии учит нас, что не следует отмахиваться от возможности открытия новых законов физики. Возможно, что лишь новое и более глубокое понимание физической действительности позволит астрономам понять природу квазаров и взрывающихся галактик.

17

ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В первые же годы космических исследований стало ясно, что одним из практических приложений этих исследований может стать космическая система связи. Всё, начиная от телефонных разговоров и до телевизионных программ, может быть ретранслировано в любую точку нашей планеты с помощью искусственных спутников, выведенных на околоземные орбиты. Поэтому ученые и инженеры, работающие в государственных и частных лабораториях, принялись за разработку устройств, необходимых для практической реализации этой идеи.

В середине 1960-х годов специалисты из лаборатории «Белл телефон компани» в Нью-Джерси (США) приступили к разработке весьма чувствительной антенны для приема сигналов от спутников связи «Эхо» и «Телстар». В 1965 г. Роберт У. Вильсон и Арно А. Пензиас провели ряд экспериментов с новой антенной, чтобы проанализировать все источники помех, которые неизбежны для всех радиоприемников и вообще электронных устройств (рис. 17.1). К их большому удивлению, они обнаружили наличие слабого шума, причины которого *не поддавались* объяснению. Еще более удивительным был тот факт, что этот слабый фон приходил, по-видимому, из всех областей неба с одинаковой интенсивностью.

Исследователи компании «Белл» не знали, что в Принстонском университете, всего в нескольких километрах от них, группа теоретиков, в которую входили Р. Г. Дикке, П. Дж. Э. Пиблз, П. Дж. Ролл и Д. Т. Уилкинсон, вела интересные расчеты. Исходя из высказанных ранее Толменом и Гамовым предположений, члены Принстонской группы рассматривали некоторые последствия гипотезы о Большом Взрыве. Если Вселенная начала существовать 18 миллиардов лет назад с первичного взрыва, то температура Вселенной на ранней стадии ее существования должна быть чрезвычайно высокой. В частности, через 1 с после рождения Вселенной ее температура должна была составлять около 10 миллиардов градусов. Принстонская группа применила здесь важный термодинамический закон: если что-нибудь (вроде газа) расширяется, то его температура обязательно падает. Значит,



РИС. 17.1.
Вильсон и Пензиас. Роберт У. Вильсон (слева) и Арно А. Пензиас (справа) стоят перед антенной, отражатель которой имеет форму огромного рупора, на территории лаборатории «Белл телефон компани» в Холмделе, Нью-Джерси. С помощью этой антенны Вильсон и Пензиас открыли 3-градусное фоновое излучение, которое представляет собой остывшее «эхо» Большого Взрыва. (С разрешения лаборатории «Белл телефон компани».)

и температура Вселенной должна уменьшаться в ходе расширения. Так, через два часа после своего рождения температура Вселенной, по-видимому, должна была понизиться до 100 миллионов градусов. Когда Вселенной было 100 лет, ее температура спустилась уже немного ниже одного миллиона градусов. А сегодня, 18 миллиардов лет спустя после этапа первичного огнен-

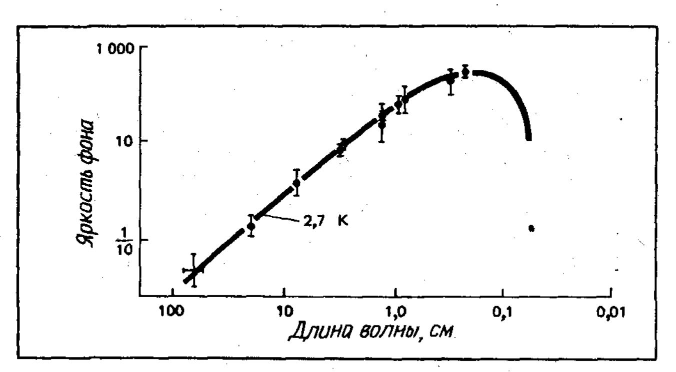


РИС. 17.2.
Фоновое излучение. Приходящие со всех сторон неба слабые радиоволны соответствуют средней температуре Вселенной 2,7 К выше абсолютного нуля.

ного шара, эта температура должна составлять около 3 градусов выше абсолютного нуля, т.е. 3 К.

Один из фундаментальных законов физики связывает температуру тел с характером испускаемого ими излучения. Так, тело, нагретое до 6000 К (такую температуру имеет поверхность Солнца), испускает главным образом видимый свет. Очень горячие объекты, температура которых достигает миллионов градусов, испускают рентгеновские лучи. Достаточно холодные объекты дают радиоволновое излучение. А если температура объекта равна 3 К, то он должен испускать радиоволны в основном с длиной волны от 1 мм до 100 см. Антенна компании «Белл» была настроена на 7,53 см, т.е. почти в точности на середину этого диапазона.

Узнав об этих расчетах, выполненных в Принстоне, Вильсон и Пензиас сразу же подумали, что таинственным источником обнаруженного ими шумового фона на самом деле может быть излучение остывшего первичного огненного шара. Были проведены наблюдения на разных длинах волн, и полученные результаты дали точки, уложившиеся на теоретическую кривую для температуры 2,7 градуса выше абсолютного нуля. Теперь все считают, что это фоновое излучение является остывшим «отголоском» Большого Взрыва.

Одним из самых замечательных особенностей *реликтового фона* является его чрезвычайная *изотропия.* В любой момент дня или ночи, в любое время года радиоастрономы всегда принимают фоновое излучение одной и той же интенсивности со всех участков неба. С точки зрения астрофизика, это удивительно, так как нет явных причин, почему температура во Вселенной в одном направлении должна быть точно такой же, как и в любом другом направлении.

С различным успехом предпринимались разные попытки объяснить изотропию реликтового фонового излучения. Например, в конце 1960-х годов Чарлз Мизнер из Мэрилендского университета предложил теорию «Вселенной-смесителя» (миксмастер-модель), исходя из необычного класса решений уравнений Эйнштейна. Миксмастер-модель претерпевает резкие сжатия попеременно во всех направлениях; считают, что она должна описывать состояние Вселенной вскоре после Большого Взрыва. Хотя работа Мизнера и позволяет понять важные аспекты возможного поведения Вселенной на ее раннем этапе существования, она не способна полностью описать изотропию 3-градусного фона. Самым главным здесь является то, что существование изотропии реликтового фонового излучения должно быть обусловлено какими-то физическими процессами.

В то время как изотропия 3-градусного фона убедительно свидетельствует об эффективных процессах перемешивания и выравнивания, которые происходили, когда возраст нашей Вселенной был менее 1 с, вся Вселенная не стала полностью однородной. Если бы 18 миллиардов лет назад вся Вселенная приобрела *полную однородность*, она оставалась бы однородной и теперь. Но в ней существуют скопления вещества в виде звезд и галактик, планет и нас с вами. Значит, процессы, приводившие к выравниванию поля излучения, не были особенно эффективны в смысле выравнивания распределения и движения вещества во Вселенной.

В начале 1970-х годов выдающийся английский астрофизик Стивен У. Хоукинг (рис. 17.3) приступил к глубокому анализу явлений, сопутствовавших катастрофическому рождению Вселенной. Прежде всего он отметил, что в обычном процессе эволюции звезд практически невозможно рождение черных дыр с массами менее 3 солнечных. Звезды, масса которых меньше, чем 3 массы Солнца, умирая, становятся белыми карликами или нейтронными звездами, о чем говорилось в гл. 7. Основной причиной, из-за которой существует эта нижняя граница для массы обычной черной дыры, является то обстоятельство, что рождение черной дыры обусловлено исключительно действием гравитационного притяжения. Лишь в том случае, когда масса умирающей звезды превышает 3 солнечные массы, гигантский вес триллионов триллионов тонн вещества, давящий со всех сторон в направлении к центру звезды, преодолевает сопротивление всех остальных физических сил и вызывает появление черной дыры. Ничто не может стать черной дырой, если его масса меньше, чем 3 солнечные массы, просто потому, что в природе существуют силы (например, давление вырожденных электронного и нейтронного газов), которые всегда останавливают процесс коллапса.

Описанное традиционное представление о массах черных дыр



РИС. 17.3.
Стивен У. Хоукинг (слева) обсуждает проблему первичных черных дыр с автором этой книги в Калифорнийском технологическом институте. (С разрешения Ч. Кейвса.)

установилось начиная с середины 1960-х годов. Во Вселенной, как мы ее теперь знаем, черной дырой не могут стать, скажем, кирпич или арбуз. В этих телах слишком мало вещества, чтобы создавалось всесокрушающее гравитационное поле. Допустим, однако, что удалось сжать до чрезвычайно малого объема тело с малой массой. Если бы было возможно сжать кирпич или арбуз так, чтобы их размеры стали чрезвычайно малы (меньше чем размеры электрона), то и эти объекты исчезли бы за своим горизонтом событий и получилась бы очень маленькая черная дыра. Хотя такие процессы сейчас явно невозможны, Хоукинг догадался, что если на раннем этапе существования Вселенной процессы в ней были такими энергичными, что смогли привести к изотропии фонового излучения, то их энергии оказалось бы достаточно, чтобы «спрессовать» множество крошечных черных дыр! Таким путем Хоукинг постулировал существование *первичных черных дыр*, которые могут обладать массами намного меньшими, чем масса Солнца. Непосредственно после Большого Взрыва

мощные катастрофические процессы могли привести к появлению первичных черных дыр с массами даже в 1/100000 г. Поэтому возможно, что повсюду во Вселенной разбросаны многочисленные очень маленькие черные дыры.

К середине 1970-х годов Хоукинг пришел к выводу, что эти первичные черные дыры должны по своим свойствам сильно отличаться от обычных, больших черных дыр. Чтобы понять, почему это так, рассмотрим обычную черную дыру, родившуюся при смерти массивной звезды. Гравитационное поле такой черной дыры дает о себе знать на миллионы километров в окружности. Даже очень далеко от черной дыры по орбитам вокруг нее могли бы обращаться планеты подобно тому, как они обращаются вокруг Солнца. Но в случае первичной черной дыры уже на расстоянии нескольких метров от нее пространство-время является практически плоским. Когда вы стоите в нескольких метрах от скалы, весящей миллиарды тонн, вы не ощущаете ее притяжения. Аналогично если бы вы стояли в нескольких метрах от первичной черной дыры, вобравшей в себя миллиарды тонн вещества, вы едва ли ощутили бы гравитационное притяжение к ней.

Все черные дыры, вне зависимости от их массы, обладают сингулярностью, окруженной горизонтом событий. Во всякой черной дыре имеется точка, в которой кривизна пространства-времени обращается в бесконечность. В случае массивной черной дыры (например, образовавшейся при смерти звезды) кривизна пространства-времени при подходе к сингулярности возрастает постепенно. Но в случае первичной черной дыры рост кривизны происходит намного быстрее. Как видно из рис. 17.4, на протяжении очень короткого пути кривизна пространства-времени возрастает так, что от почти плоской области мы попадаем в очень сильно искривленную. Это означает, что *приливные силы* – те самые, которые стремятся разорвать все тела на части, – вблизи первичной черной дыры должны быть чрезвычайно велики. Хотя гравитационное поле здесь в среднем слабое, приливные натяжения около маленькой черной дыры намного сильнее, чем около обычной черной дыры.

Как отмечалось в конце гл. 14, физикам-теоретикам нередко оказывалось полезным представлять себе пустое пространство как состоящее из виртуальных пар частиц и античастиц. Пользуясь представлением о виртуальных парах частиц, намного проще описывать процессы рождения и уничтожения пар, наблюдаемые физиками-ядерщиками в их лабораториях.

Рассмотрим теперь пустое пространство в непосредственных окрестностях маленькой первичной черной дыры. Как отмечалось выше, в этой области пространства существуют мощнейшие приливные силы. Имеются все основания считать, что это пустое пространство содержит виртуальные пары частиц и античастиц.

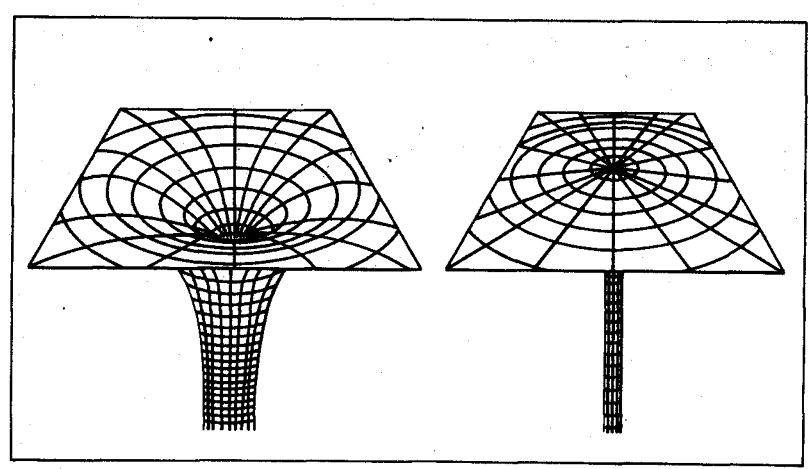


РИС. 17.4.

Большие и маленькие черные дыры. Изменение кривизны пространства-времени происходит гораздо стремительнее около первичных черных дыр, чем около обычных (массивных) черных дыр. Вблизи первичной черной дыры приливные силы должны быть особенно велики.

Исходя из этого факта, Хоукинг пришел к выводу, что величина этих приливных сил достаточна для того, чтобы придать виртуальным парам энергию, достаточную для их превращения в реальные пары частица–античастица, которые появятся в пространстве. Иными словами, маленькие черные дыры должны испускать большое количество частиц и античастиц!

Здесь вы можете сказать, что подобный процесс рождения вещества и антивещества черной дыры сможет привести к испусканию в окружающий мир частиц *лишь* в том случае, если он происходит вне горизонта событий черной дыры. Но следующий важный теоретический результат Хоукинга (полученный им в 1974 г.)–это доказательство того, что это совсем не обязательно. Даже если частицы родились внутри дыры, существует отличная от нуля вероятность, что они выйдут сквозь горизонт событий во внешнюю Вселенную. Чтобы понять, почему частицы могут проходить сквозь горизонт событий, нужно разобраться в некоторых основных представлениях *квантовой механики.*

В начале нашего века, когда физики начали серьезно задумываться над тем, что представляют собой атомы, электроны, протоны и другие субатомные частицы, они считали эти частицы, в сущности, маленькими кусочками обычного вещества. В первых грубых моделях атома было общепринятым, например, рассматривать электроны как крошечные бильярдные шары. Такое представление об субатомных частицах опиралось на законы в классической физике XIX в. (рис. 17.5, *вверху*).



РИС. 17.5.

Субатомная частица. С точки зрения классической физики XIX в. такие частицы, как электроны или протоны, рассматривались по аналогии с маленькими бильярдными шарами. Но разработанная в XX в. квантовая механика описывает субатомные частицы с помощью волновых пакетов.

В ходе развития атомной и ядерной физики стало ясно, что представление о частицах как о бильярдных шарах чересчур ограниченно и потому имеет слишком узкие пределы применимости. Так, Вернер Гейзенберг обнаружил, что при рассмотрении весьма малых расстояний (порядка внутриатомных) невозможно точно определить, где в действительности находится такая частица, как электрон, если точно известна ее скорость. Такая невозможность точного установления положения любой субатомной частицы при знании ее скорости и наоборот легла в основу *принципа неопределенности Гейзенберга.* Суть его в том, что физик может говорить о *вероятности* того, что частица находится в определенный момент времени в данной точке пространства. Поэтому физики пришли к выводу, что гораздо полезнее и правильнее представлять себе субатомные частицы как *волновые пакеты*, изображение одного из которых приведено на рис. 17.5, *внизу.* Именно такая волновая модель частицы лежит в основе той области физики, которая называется квантовой механикой.

На основе квантовомеханического подхода оказалось возможным понять много явлений, совершенно необъяснимых с точки зрения старой модели бильярдных шаров. Хорошим примером может служить действие транзисторов и диодов в электронных устройствах. В некоторых типах диодов электрическое поле создает *потенциальный барьер*, настолько сильный, что он должен был бы воспрепятствовать электронам переходить с одной стороны диода на другую. В этом смысле потенциальный барьер можно представлять себе как «стенку». В прежней модели электрона (бильярдный шар) он должен был бы попросту отскочить от такой стенки, как это показано на рис. 17.6, *вверху.* Однако если представлять себе электрон как волновой пакет, то существует определенная вероятность того, что он проникнет за потенциальный барьер. Такое явление называют *туннельным эффектом*; оно схематически изображено на рис. 17.6, *внизу.*

Окружающее черную дыру гравитационное поле можно представить себе как потенциальный барьер, запрещающий в класси-

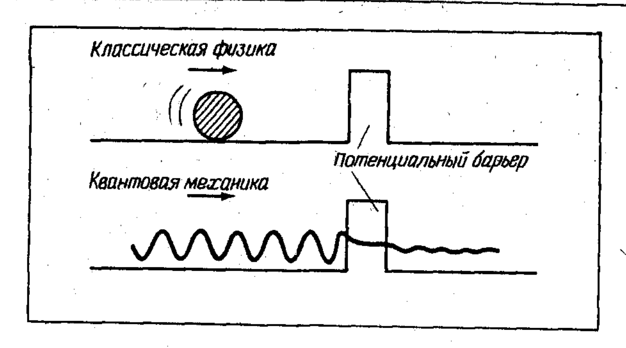


РИС. 17.6.

Туннельный эффект. С классической точки зрения электрон никогда не может преодолеть высокий потенциальный барьер. Однако с точки зрения квантовой механики субатомные частицы способны просочиться с одной стороны барьера на другую.

ческой теории чему бы то ни было выходить из дыры. В том случае, когда черная дыра очень массивна, ее сильное гравитационное поле простирается на такое большое расстояние, что потенциальный барьер оказывается очень *толстым*. Вероятность того, что частица сможет благодаря туннельному эффекту пройти сквозь толстый потенциальный барьер, практически равна нулю (см. рис. 17.7, *вверху*). Но в маленькой первичной черной дыре гравитационное поле оказывается сильным лишь в очень небольшой области. Это означает, что окружающий маленькую черную дыру потенциальный барьер является очень *тонким*, в результате чего существует заметная вероятность того, что частицы смогут пройти сквозь него в окружающую Вселенную

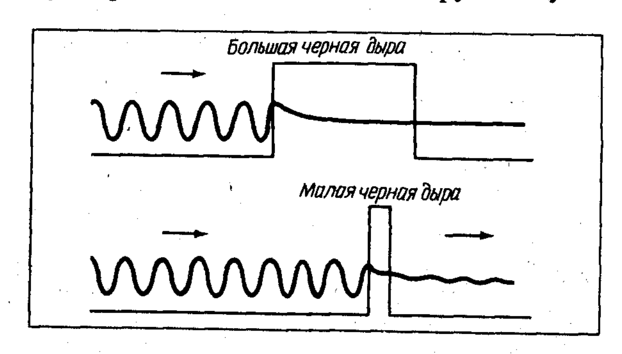


РИС. 17.7.

Выход из черной дыры благодаря туннельному эффекту. Гравитационное поле массивной черной дыры простирается на столь далекие расстояния, что создаваемый им потенциальный барьер оказывается очень толстым. Поэтому частицам почти невозможно пройти сквозь него в окружающую Вселенную. Если же черная дыра мала, то ее потенциальный барьер достаточно тонок, и вещество может вырваться из дыры.

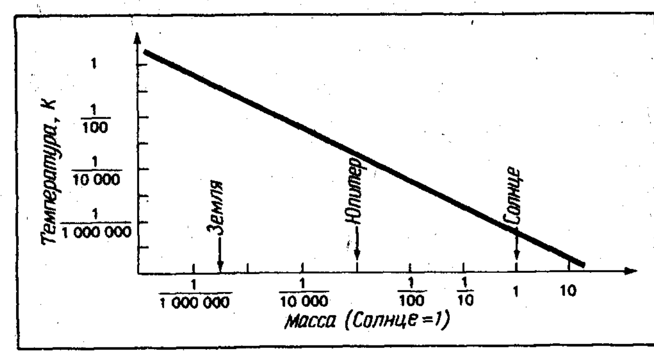


РИС. 17.8.

Большие черные дыры являются холодными. Так как частицам почти невозможно пройти сквозь толстый потенциальный барьер, окружающий большие черные дыры, температура последних является очень низкой.

(рис. 17.7, *внизу*). Итак, частицы и античастицы, рожденные внутри горизонта событий, могут пройти сквозь тонкий потенциальный барьер маленькой черной дыры и выйти из нее! Это замечательное открытие, что вещество способно выходить из черной дыры, означает, что черные дыры ведут себя как белые дыры. Развивая эту мысль, Хоукинг смог в 1975 г. доказать, что *маленькие черные дыры совершенно неотличимы от маленьких белых дыр*!

Тот факт, что черные дыры испускают вещество и излучение, означает, что черной дыре на основе законов термодинамики можно приписать температуру. Температура черной дыры – это непосредственная мера того, с какой скоростью дыра испускает частицы и излучение. Так как потенциальный барьер массивных черных дыр толст, то вероятность прохода любого объекта сквозь него близка к нулю. Значит, температура массивной черной дыры должна быть близка к абсолютному нулю. Например, температура черной дыры, возникающей при смерти массивной звезды, будет менее 1/10000000 градуса выше абсолютного нуля. Поэтому квантовомеханические эффекты, предсказанные Хоукингом, совершенно несущественны для массивных черных дыр. На рис. 17.8 приведен график, связывающий температуру и массу больших черных дыр. Те черные дыры, масса которых превышает массу Земли, обладают температурой менее 1/10 градуса выше абсолютного нуля.

Большие черные дыры являются холодными, так как их окружает толстый потенциальный барьер, практически не дающий ничему из них уходить сквозь горизонт событий. Маленькие черные дыры (разумеется, если они вообще существуют) должны обладать тонкими потенциальными барьерами. Согласно квантовой механике, частицы и излучение могут выходить из этих дыр,

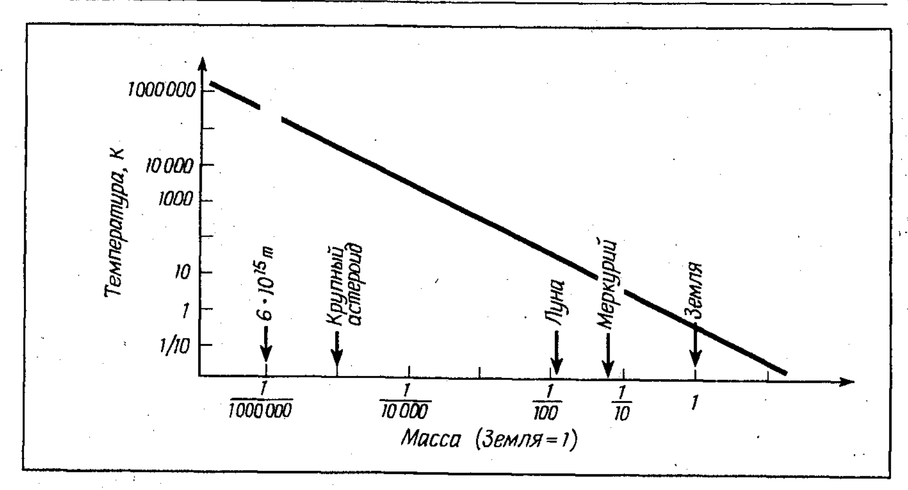


РИС. 17.9.

Маленькие черные дыры являются горячими. Черные дыры малой массы окружены тонким потенциальным барьером. Чем меньше масса, тем тоньше потенциальный барьер. Частицы и излучение могут проходить сквозь него благодаря туннельному эффекту, и поэтому температура маленьких черных дыр может быть достаточно велика.

а значит, они должны обладать заметной температурой. На рис. 17.9 показан график, связывающий температуру и массу маленьких черных дыр. Как видно, черная дыра с массой порядка массы среднего астероида должна обладать температурой около 100 000 К.

Очень маленькие черные дыры должны обладать исключительно тонкими потенциальными барьерами, через которые сможет легко выходить в окружающую Вселенную и излучение, и частицы. Поэтому температура очень малых черных дыр должна быть поистине огромна. Черная дыра с массой 1 000 000 т испускает столько вещества и энергии, что ее температура равняется квадрильону (10^{15}) градусов. При массе в 1 т температура черной дыры равна 10^{21} (миллиард триллионов) градусам. На рис. 17.10 представлен ход температур черных дыр в очень широком диапазоне масс.

При испускании очень малой черной дырой вещества и излучения ее масса должна уменьшаться. Если черная дыра испускает 1 кг вещества, ее масса должна уменьшиться в точности на 1 кг. Этот простой факт влечет за собой очень важные следствия. Испуская вещество и излучение, черная дыра теряет свою массу. При уменьшении массы черной дыры потенциальный барьер вокруг нее становится тоньше, ее температура растет, и соответственно дыра начинает испускать все больше частиц и энергии. И чем больше она излучает, тем меньше становится, а чем мень-

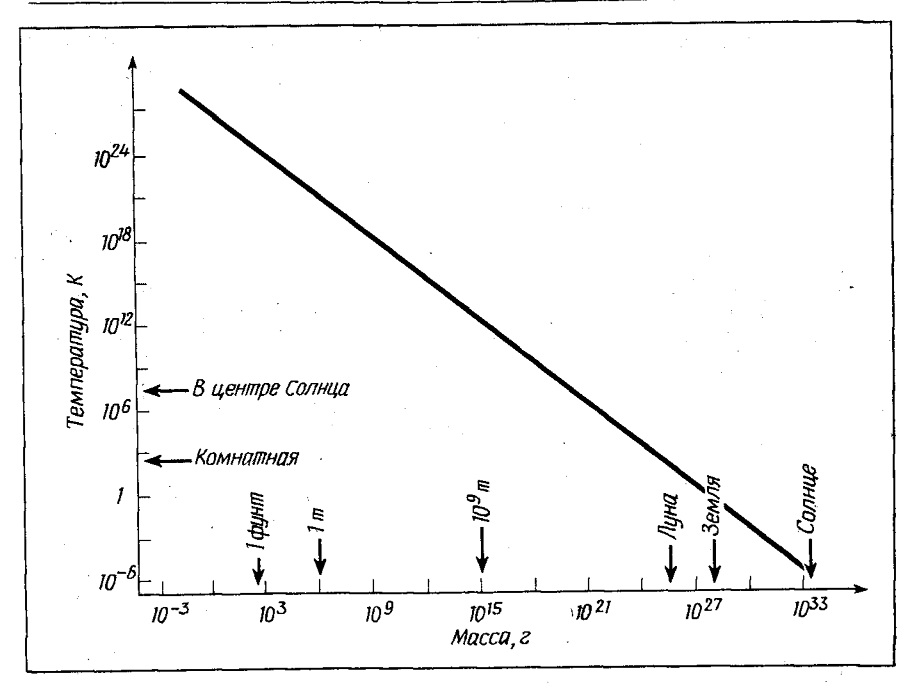


РИС. 17.10.

Температура черных дыр. Чем меньше масса черной дыры, тем выше ее температура. Температура очень маленьких черных дыр может быть крайне высокой.

ше становится, тем больше излучает. Таким образом черная дыра буквально съедает сама себя – она испаряется, причем процесс испарения самоускоряется по мере уменьшения массы дыры. Это ускорение настолько усиливается, что очень маленькие черные дыры в последние секунды своего существования просто взрываются. Полное количество энергии, выделяемое за последнюю секунду испарения черной дырой, эквивалентно взрыву водородной бомбы мощностью миллиард мегатонн!

Если нашей Вселенной уже 18 миллиардов лет и если первичные черные дыры образовались во время Большого Взрыва, то на сегодня все очень маленькие черные дыры уже давно испарились. Очень маленькие черные дыры должны быть такими горячими и испускать так много вещества, что им просто невозможно было бы просуществовать сколько-нибудь долгое время. Поэтому можно говорить о времени жизни черной дыры. Черная дыра, возникшая из 100 т вещества, должна быть настолько горячей, что смогла бы просуществовать всего 1/10000 с до того, как полностью испариться. Черной дыре с массой 1 миллион тонн для полного испарения требуется около 3 лет. Черная дыра

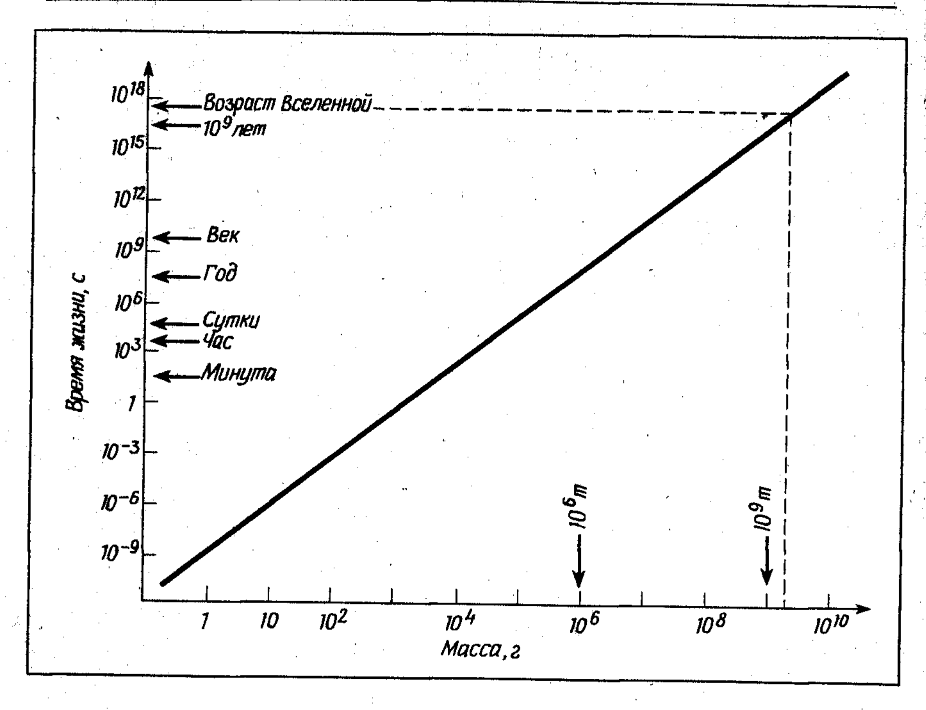


РИС. 17.11.
Время жизни черных дыр. По мере того как черная дыра испускает частицы и излучение, ее масса уменьшается. По мере уменьшения массы черная дыра испускает все больше частиц и излучения, так как ее температура растет. Этот самоускоряющийся процесс приводит к тому, что в конце концов все черные дыры *испаряются*. За последние несколько микросекунд такого испарения черная дыра выделяет количество энергии, эквивалентное взрыву миллиарда мегатонных водородных бомб! Так как возраст Вселенной составляет около 18 миллиардов лет, все черные дыры с массами менее нескольких миллиардов тонн должны к нашим дням уже испариться.

с массой 1 миллиард тонн продержится около 3 миллиардов лет. На рис. 17.11 приведены времена жизни для черных дыр различных масс.

Так как время жизни первичной черной дыры определяется ее начальной массой, ясно, что самые маленькие черные дыры, возникшие при большом взрыве, уже должны были испариться. До наших дней могли сохраниться лишь те из первичных черных дыр, массы которых превышали несколько миллиардов тонн (10^{15} г). Значит, если ученым и удастся когда-нибудь обнаружить в космосе первичные черные дыры, то они будут не менее массивны, чем средний астероид, хотя, вероятно, их размеры не будут превышать размеров атома. Обнаружить эти весьма малые

объекты было бы возможно по испускаемой ими огромной энергии, вероятно, в виде очень жестких гамма-лучей.

Проблема возможного обнаружения первичных черных дыр в космосе самым непосредственным образом связана с тем, сколько же таких дыр должно было образоваться во время Большого Взрыва? В конце 1975 г. Бернард Карр, несколько лет работавший с Хоукингом, выдвинул серьезные доводы в пользу того, что первичных черных дыр должно быть довольно много. Карр имел в виду, что в центре галактик возможно присутствие массивных первичных черных дыр (с массами более миллиона масс Солнца). Если это так, то, быть может, рядом с нашей Солнечной системой или даже в ее составе найдутся две-три маленькие первичные черные дыры. Возможно (хотя и маловероятно), что маленькая черная дыра обращается по орбите около Солнца, не замечаемая нами.

Если бы в нашей Солнечной системе или вблизи нее была обнаружена первичная черная дыра, отсюда следовали бы выводы большой важности. Я думаю, что сейчас мы располагаем уже техникой, позволяющей отправиться на ловлю такой черной дыры с тем, чтобы доставить ее на Землю. Если поместить эту дыру на орбиту около Земли, то энергию, которую она испаряет, можно передавать на Землю пучком микроволн, получая таким образом огромное количество энергии без загрязнения среды. Это повлекло бы за собой большие экономические и социальные последствия. Мы не только перестали бы зависеть от ископаемых в виде горючего, но и термоядерное оружие оказалось бы бесполезной игрушкой, если бы на околоземной орбите оказалась черная дыра. Поэтому не исключено, что заумные математические расчеты горстки астрофизиков-теоретиков окажут серьезное воздействие на весь ход истории человечества.

ПОСЛЕДНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, КАСАЮЩИЕСЯ ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

В конце 1976 г., когда рукопись этой книги отправлялась в типографию, были получены некоторые важные теоретические результаты, касающиеся возможности существования большого числа первичных черных дыр, разбросанных по всей Вселенной. Я рад, что мне удалось включить в книгу эти краткие замечания.

В начале 1970-х годов Стивен Хоукинг показал, что во время Большого Взрыва могло образоваться множество маленьких черных дыр. К середине 1970-х годов он заключил, что вследствие квантовомеханических эффектов эти первичные черные дыры должны испускать частицы и излучение. В результате такого процесса испускания вещества и энергии первичные черные дыры испаряются и взрываются. Во время взрыва первичной черной дыры вся ее масса преобразуется в весьма краткую и мощную вспышку гамма-лучей очень высокой энергии. Как упоминалось в конце гл. 17, все первичные черные дыры малой массы теперь должны уже были испариться. Дожить до наших дней могли лишь первичные черные дыры умеренной массы, т.е. те из них, масса которых превышает несколько миллиардов тонн ($5 \cdot 10^{14}$ г).

В 1975 г. Джордж Ф. Чаплин заметил, что по наблюдаемому фону гамма-лучей можно оценить максимальное число первичных черных дыр, существующих сейчас во Вселенной. Если предположить, что все наблюдаемое гамма-излучение космического фона вызывается испарением черных дыр, то, как показал Дон Н. Пейдж, внутри галактик не может быть более чем 300 миллионов первичных черных дыр на каждый кубический световой год, если считать, что все дыры находятся именно в галактиках. (Этот «верхний предел» снижается до значения 300 первичных черных дыр на кубический световой год, если дыры распределены во Вселенной равномерно.) Конечно, значительная часть фонового гамма-излучения может быть обусловлена иными эффектами, а не испарением первичных черных дыр, так что число этих черных дыр, существующих сегодня, должно быть намного меньше, чем приведенный выше верхний предел.

В октябре 1976 г. Д. Н. Ч. Лин, Б. Дж. Карр и С. М. Фолл, разрабатывавшие эту проблему, опубликовали результаты своих вычислений. Они показали, что наблюдаемое фоновое гамма-излучение не обязательно ограничивает верхний предел числа первичных черных дыр, которые могли бы существовать в наше время. Лин, Карр и Фолл доказали, что при некоторых обстоятельствах очень малые первичные черные дыры, образовавшиеся во время Большого Взрыва, могут так сильно вырасти, что превратятся в первичные черные дыры умеренной массы (т.е. в дыры, имеющие массу порядка миллиардов тонн) еще до того, как пройдет 1/10000 с с момента рождения Вселенной. Если это действительно имело место, то в космосе могут быть рассеяны большие количества первичных черных дыр умеренной массы. Так как они еще не испарились полностью и не взорвались, их присутствие остается незамеченным и они еще не внесли своего вклада в фоновое гамма-излучение.

Маленькие первичные черные дыры смогут превратиться в дыры умеренной массы, лишь если на самых ранних этапах существования Вселенной давление будет достаточно велико. Точнее говоря, рост масс первичных черных дыр зависит от уравнения состояния, характеризующего Вселенную на ранних этапах. Уравнение состояния выражает связь между давлением и плотностью материи. Если давление настолько велико, что равно плотности, то уравнение состояния называют «жестким». Обычно же давление меньше, чем плотность, и уравнение состояния характеризуется как «мягкое». Если сразу же после Большого Взрыва условия во Вселенной были такими, что ее уравнение состояния было «жестким», то давление (по сравнению с плотностью) могло оказаться настолько большим, что вещество под действием этого давления спрессовывалось в маленькие первичные черные дыры. Затем по той же причине эти черные дыры очень быстро вырастали, становясь черными дырами умеренной массы.

Когда возраст Вселенной превысил 1/10000 с, уравнение состояния должно было стать «мягким» и оставаться таким всегда. Начиная с этого момента, материя во Вселенной стала достаточно рассеянной для того, чтобы уравнение состояния уже никогда не смогло стать «жестким». Вопрос о том, было ли уравнение состояния для Вселенной до возраста 1/10000 с «жестким», остается очень спорным. Однако Лин, Карр и Фолл доказали, что если уравнение состояния для Вселенной было «жестким» только в течение первой одной триллион-триллионной секунды (10^{-24} с) после Большого Взрыва, то давление должно было оставаться в течение достаточно длительного периода столь высоким, чтобы все первичные черные дыры приобрели умеренное значе-

ние массы (т. е. чтобы масса каждой из них превысила несколько миллиардов тонн). Ни одна из таких первичных черных дыр не стала бы достаточно малой, чтобы полностью испариться до наших дней. Все они должны были бы сохраниться до сих пор, а некоторые, может быть, находятся где-то здесь, в нашей Солнечной системе!

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Аберрация (света звезд). Явление, при котором вследствие движения наблюдателя изображение звезды смещается в сторону движения.

Абсолютная звездная величина. Мера истинной яркости звезды. Согласно определению, это та видимая звездная величина, которую имела бы данная звезда с расстояния 10 парсек.

Абсолютно удаленное. Область пространства-времени, абсолютно недостижимая для материальных объектов из вершины светового конуса.

Абсолютный нуль температуры. Температура 0 градусов Кельвина (0 К), т. е. примерно минус 273°С. Самая низкая из возможных температур.

Азимутальный угол. Здесь угол, отсчитываемый от оси вращения тела черной дыры.

Аккреция. Процесс, при котором массивный объект «засасывает» окружающее вещество вследствие своего тяготения.

Антигравитация. Такое гравитационное поле, которое отталкивает вещество и световые лучи.

Астероид. Малая планета; большое число астероидов обращается вокруг Солнца, обычно в промежутке между орбитами Марса и Юпитера.

Атом. Наименьшая частица химического элемента, которая еще обладает свойствами, характерными для этого элемента.

Афелий. Точка орбиты тела, обращающегося вокруг Солнца, которая находится на наибольшем удалении от Солнца (для орбиты тела, обращающегося вокруг Земли, аналогичная точка называется **апогеем**).

Белая дыра. Область мощного гравитационного поля, включающая сингулярность и горизонт событий, откуда выбрасываются вещество и энергия. Соответствует черной дыре, обращенной во времени.

Белый карлик. Очень маленькая и горячая звезда, приблизившаяся к концу своей эволюции.

Большой Взрыв. Первичный взрыв, из которого, согласно современным представлениям, возникла наблюдаемая Вселенная.

Будущее. Та область пространства-времени, куда идут мировые линии материальных объектов.

Взрыв черной дыры. Катастрофический завершающий этап испарения первичной черной дыры.

Виртуальная пара. Пара частица-античастица в вакууме, которая еще не превратилась в реальные частицу-античастицу.

Внутренняя точка Лагранжа. В двойной системе звезд – точка между двумя частями предельной кривой (поверхности) Роша.

Возмущение. Малое отклонение от нормального состояния, вызванное внешними причинами.

Волновое уравнение. Уравнение, описывающее процесс распространения волны.

Волновой пакет. Квантовомеханическая модель частицы как сгустка волн.

Временноподобная бесконечность будущего (I^+). Та область пространства-времени в очень далеком будущем, куда идут мировые линии частиц вещества.

Временноподобная бесконечность прошлого (I^-). Та область пространства-времени в удаленном прошлом, откуда пришли все мировые линии частиц вещества.

Временноподобная мировая линия. Мировая линия («траектория») в пространстве-времени, образующая с осью времени угол менее 45°.

Вселенная с антигравитацией. Вселенная, в которой гравитация носит характер отталкивания, – Вселенная по «ту» сторону кольцевой сингулярности керровской черной дыры.

Вторичные космические лучи. Вторичные частицы, возникшие при взаимодействии между частицами первичных космических лучей, пришедшими из космоса, и ядрами атомов атмосферы Земли.

Гамма-лучи. Фотоны с энергией, превышающей энергию фотонов рентгеновских лучей. Это самая высокоэнергичная форма электромагнитного излучения.

Геодезическая. Кратчайший путь (мировая линия) между двумя событиями в искривленном пространстве-времени. В плоском пространстве-времени геодезическая – это прямая линия.

Гипербола. Одно из конических сечений – кривая, которую можно получить, рассекая конус плоскостью.

Гиперповерхность. Двумерный срез (чаще трехмерный срез) через четырехмерное пространство-время.

Гиперсфера. «Сфера» в гипотетическом многомерном пространстве.

Главная последовательность. Совокупность звезд на диаграмме Герцшпрунга – Рассела, основным источником энергии которых является термоядерное «сжигание» водорода.

«Голая» сингулярность. Пространственно-временная сингулярность, не окруженная горизонтом событий.

Горизонт событий. Совокупность тех мест в пространстве-времени, где, с точки зрения удаленного наблюдателя, время останавливается. Горизонт событий является поверхностью, окружающей черную дыру.

Гравитационная антенна. Устройство, предназначенное для обнаружения гравитационных волн.

Гравитационная волна. «Рябь» пространства-времени, бегущая со скоростью света.

Гравитационная линза. Искажение изображения объекта или образование его множественных изображений под действием сильного гравитационного поля.

Гравитационное красное смещение. Эффект замедления времени в гравитационном поле, предсказываемый общей теорией относительности.

Гравитация. Явление притяжения материальных объектов друг другом.

Давление вырожденного нейтронного газа. Давление нейтронов, которое возникает в силу принципа запрета Паули; оно противостоит усиливающемуся сжатию вещества звезды на стадии нейтронной звезды.

Давление вырожденного электронного газа. Давление электронов, которое возникает в силу принципа запрета Паули; оно противостоит усиливающемуся сжатию вещества звезды на стадии белого карлика.

Двойная звезда. Система двух звезд, обращающихся вокруг общего центра масс.

Деферент. В геоцентрической системе Птолемея – окружность, по которой движутся эпициклы.

Диаграмма вложения. Изображение пространственноподобной гиперповерхности, представляющей собой срез четырехмерного искривленного пространства-времени.

Диаграмма Герцшпрунга–Рассела. Диаграмма, выражающая связь между светимостями и температурами звезд.

Диаграмма Крускала - Секереша. Диаграмма пространства-времени шварцшильдовской черной дыры, описывающая *всю* геометрию дыры.

Диаграмма Пенроуза. Конформная карта, охватывающая *все* пространство-время.

Диск аккреции. Диск вещества, вращающийся вокруг черной дыры.

Длина волны. Расстояние между двумя последовательными горбами (или впадинами) волны.

Доплеровское смещение. Смещение линий спектра вследствие доплер-эффекта.

Доплер-эффект. Явление, состоящее в том, что длины волн любого излучения изменяют свое значение вследствие относительного движения источника и наблюдателя.

Закон Хаббла. Связь между величиной красного смещения для далеких галактик и расстоянием до них.

Законы Кеплера. Сформулированные Иоганном Кеплером

три закона, которые описывают движение планет вокруг Солнца.

Законы Ньютона. Законы механики и тяготения, сформулированные Исааком Ньютоном.

Замедление времени. Явление, состоящее в том, что с точки зрения покоящегося наблюдателя часы движущегося наблюдателя отстают.

Затмение. Явление, при котором весь свет от одного тела или часть его заслоняется другим телом, проходящим между первым телом и наблюдателем. Пример – солнечные затмения.

Затменная двойная (звезда). Двойная звезда, орбиты компонентов которой расположены так, что, если смотреть с Земли, каждая из двух звезд поочередно проходит перед другой.

Звезда главной последовательности. Звезда, которая изображается на диаграмме Герцшпрунга – Рассела точкой, находящейся на главной последовательности.

Звездная величина видимая. Мера наблюдаемого блеска звезды на небе.

Звездный ветер. Поток протонов и электронов, постоянно испускаемых звездой (например, Солнцем) и обладающих большими скоростями.

Изотропия. Свойство обладать одинаковыми характеристиками во всех направлениях.

Инвариант. Величина, значение которой одинаково для всех наблюдателей независимо от их состояния движения.

Интервал. «Расстояние» в пространстве-времени между двумя событиями.

Интерференционные полосы. Темные и светлые полосы, возникающие при взаимном уничтожении или усилении волн в двух световых пучках, когда они смешиваются.

Интерферометр Майкельсона. Прибор, изобретенный Альбертом А. Майкельсоном и первоначально предназначавшийся для наблюдения движения Земли относительно мирового «эфира».

Испарение черной дыры. Процесс, в ходе которого черная дыра испускает частицы и излучение.

Каталог Мессье. Каталог незвездных объектов, составленный Шарлем Мессье в 1787 г.

Квазар. Звездоподобные объекты, находящиеся, как полагают, на огромном расстоянии от нашей Галактики; часто являются мощными источниками радиоизлучения.

Квантовая механика. Область физики, изучающая свойства и поведение атомов и субатомных частиц.

Керровская черная дыра. Черная дыра, обладающая массой и моментом количества движения,- электрически нейтральная вращающаяся черная дыра.

Коллапс. Явление катастрофического сжатия тела под действием его собственного гравитационного поля.

Кольцевая сингулярность. Сингулярность в керровской черной дыре.

Комета. Небольшой объект, состоящий из пыли, газа и льда и обычно движущийся по сильно вытянутой эллиптической (или даже параболической или гиперболической) орбите вокруг Солнца.

Конические сечения. Семейство кривых, которые можно получить как линии пересечения поверхности конуса и плоскости, когда последняя образует разные углы с осью конуса. Частные случаи конических сечений: окружность, эллипс, парабола, гипербола, прямая.

Конус убегания. Воображаемый конус у поверхности коллапсирующей звезды, с помощью которого можно определить, какие лучи света способны уйти от звезды на бесконечность.

Конформная карта. Диаграмма пространства-времени, построенная по определенному математическому рецепту таким образом, чтобы охватывать все области пространства-времени сразу.

Конформное отображение. Метод построения конформных карт пространства-времени.

Координатное время. Время, которое измеряет наблюдатель, находящийся в плоском пространстве-времени далеко от всех источников тяготения (иногда определяется просто как переменная, описывающая течение времени, но в остальном совершенно произвольная).

Космические лучи. Приходящие на Землю из космоса с очень большой скоростью частицы (в основном протоны и электроны).

Космологическая модель Большого Взрыва. Космологическая модель Вселенной, в основу которой положено предположение о первичном взрыве как начале существования наблюдаемой Вселенной.

Красное смещение. Увеличение длины волны электромагнитного излучения при движении источника излучения от наблюдателя.

Красный гигант. Очень большая по размерам звезда с низкой (~ 3000 К) температурой поверхности.

Массивная черная дыра. Черная дыра с массой примерно от 100 до 1000 масс Солнца.

Машина времени. Гипотетическое устройство, с помощью которого можно путешествовать в далекое будущее или в прошлое.

Маятниковая круговая орбита. Разновидность круговой орбиты для света, характерная для отрицательного пространства керровской черной дыры.

Механизм Пенроуза. Способ извлечения энергии из вращающейся черной дыры.

«Миксмастер»-Вселенная. Теоретическая модель Вселенной,

испытывающая попеременно сильное сжатие и расширение во всевозможных направлениях (что приводит к перемешиванию ее содержимого).

Мировая линия. «Траектория» объекта в пространстве-времени.

Модель звезды. Результат теоретического расчета физических условий внутри звезды.

Момент количества движения. Мера количества движения вращающегося тела; для материальной точки равен произведению ее массы на линейную скорость и на расстояние от оси вращения.

Нейтрон. Субатомная частица, у которой нет электрического заряда, а масса приблизительно равна массе протона.

Нейтронная звезда. Сильно сжатая звезда, которую поддерживает в равновесии давление вырожденного нейтронного газа. Состоит в основном из нейтронов.

Неправильная галактика. Галактика несимметричной формы.

Новая звезда. Звезда, проходящая стадию резкого выброса вещества и временно увеличившая свою светимость в сотни или тысячи раз.

Общая теория относительности. Теория гравитации, выражающая тяготение через геометрию пространства-времени.

Оптическая двойная система. Двойная звезда, оба компонента которой поддаются наблюдению.

Опыт Майкельсона–Морли. Опыт, впервые выполненный в 1888 г. Альбертом А. Майкельсоном и Эдвардом У. Морли и показавший, что «эфира» в действительности не существует.

Орбита. Траектория тела, обращающегося вокруг другого тела или вокруг некоторой точки.

Отрицательное пространство. Область пространства «по ту сторону» кольцевой сингулярности керровской черной дыры.

Парабола. Одно из конических сечений – кривая, которая получается, если пересечь конус плоскостью, параллельной одной из образующих конуса (точнее, параллельной какой-либо из плоскостей, касательных к конусу).

Парадокс близнецов. Кажущийся парадокс, связанный с представлением, что вследствие эффекта замедления времени два релятивистских путешественника, когда-то расставшиеся, а затем встретившиеся вновь, должны утверждать, что каждый из них провел в путешествии больше времени, чем другой.

Параллакс. Кажущийся сдвиг объекта при движении наблюдателя.

Параллакс звезды. Кажущийся сдвиг достаточно близкой звезды при движении Земли вокруг Солнца (вследствие наблюдения с разных концов диаметра земной орбиты).

Парсек. Единица длины, равная 3,26 светового года. Параллакс звезды, которая находилась бы на расстоянии 1 пс от Земли, равнялся бы 1″.

Первичная черная дыра. Очень маленькая черная дыра (с массой менее одной массы Солнца), которая могла бы образоваться в период Большого Взрыва.

Первичные космические лучи. Частицы космических лучей, приходящие извне земной атмосферы (в противоположность вторичным космическим лучам, частицы которых образуются при столкновениях первичных космических лучей с молекулами газов атмосферы Земли).

Первичный огненный шар. Чрезвычайно горячий газ (состоящий из элементарных частиц и излучения), из которого, как полагают, состояла вся наблюдаемая Вселенная сразу после Большого Взрыва.

Переменная звезда. Звезда, светимость которой более или менее периодически меняется со временем.

Перенос массы. Процесс, при котором масса перетекает между компонентами двойной звезды.

Перигелий. Наиболее близкая к Солнцу точка орбиты тела, обращающегося вокруг Солнца (при обращении вокруг Земли аналогичная точка называется **перигеем**).

Планетарная туманность. Газовая оболочка, отделившаяся от звезды, когда она приближается к концу своего жизненного цикла.

Позитрон. Антиэлектрон; частица, аналогичная электрону, только с зарядом противоположного (положительного) знака.

Потенциальный барьер. Область пространства, в которую проникновению частиц препятствуют действующие там силы.

Предел статичности. Поверхность (окружающая черную дыру), внутри которой невозможно оставаться в состоянии покоя.

Предел Чандрасекара. Верхний предел величины массы белого карлика, равный примерно 1,5 массы Солнца.

Предельная керровская дыра. Электрически нейтральная вращающаяся черная дыра, для которой $M = a$.

Предельная поверхность Роша. Воображаемая поверхность (при виде сбоку имеет форму восьмерки), которая окружает обе звезды в двойной системе и указывает эффективные границы гравитационного воздействия каждой из них.

Предельная черная дыра Райснера–Нордстрёма. Электрически заряженная невращающаяся черная дыра, для которой $M = |Q|$.

Преобразования Лоренца. Система соотношений в частной теории относительности, связывающих результаты измерений, производимых двумя наблюдателями, которые движутся относительно друг друга. Обычно речь идет об измерениях времени и расстояния, но иногда говорят о массе и т. д.

Принцип беспорядка. Представление о том, что сингулярность пространства-времени совершенно беспорядочно порождает вещество и энергию.

Принцип запрета Паули. Физический закон, согласно которому две одинаковые частицы (скажем, электроны или нейтроны) с одними и теми же значениями спина и скорости не могут одновременно находиться в одном и том же месте.

Принцип ковариантности. Утверждение, что большинство фундаментальных законов физики должно формулироваться независимо от состояния движения наблюдателя.

Принцип причинности. Утверждение, что следствия должны происходить *после* своих причин, а не *до* них.

Принцип эквивалентности. Представление о том, что в малых областях пространства-времени тяготение невозможно отличить от ускорения. Формулируется также как утверждение о равенстве инертной и гравитационной масс.

Пространственноподобная бесконечность (I^0). Та очень удаленная область пространства-времени, в которую идут только пространственноподобные мировые линии.

Пространственноподобная мировая линия. «Траектория» в пространстве-времени, наклоненная по отношению к оси времени на угол, превышающий 45°.

Пространство-время. Непрерывное четырехмерное многообразие (континуум), в котором три измерения пространственные, а четвертое – временное.

Протон. Тяжелая субатомная частица, несущая положительный электрический заряд,– одна из двух главных составных частей атомного ядра. Протон – ядро атома обычного («легкого») водорода.

Прошлое. Та область пространства-времени, откуда приходят мировые линии всех материальных объектов.

Пульсар. Импульсный источник космического радиоизлучения (разновидность нейтронной звезды).

Радиотелескоп. Инструмент, предназначенный для приема радиоволн, приходящих от космических источников.

Решение Керра. Решение уравнений гравитационного поля в общей теории относительности, описывающее электрически нейтральную вращающуюся черную дыру.

Решение Керра–Ньюмэна. Решение уравнений гравитационного и электромагнитного полей в общей теории относительности, описывающее заряженную вращающуюся черную дыру.

Решение Райснера–Нордстрёма. Решение уравнений гравитационного и электромагнитного полей в общей теории относительности, описывающее невращающуюся заряженную черную дыру.

Решение Шварцшильда. Решение уравнений гравитационного поля в общей теории относительности, описывающее невращающуюся электрически нейтральную черную дыру.

Рождение пар. Процесс, при котором порождаются пáры частиц и античастиц.

Сверхизлучательное рассеяние. Явление усиления света, проходящего вблизи вращающейся черной дыры.

Сверхмассивная черная дыра. Черная дыра, масса которой превышает 100 000 масс Солнца.

Сверхновая. Грандиозный взрыв звезды, который иногда происходит вблизи конца эволюции очень массивных звезд.

Свет. Электромагнитное излучение, видимое для глаз.

Световая бесконечность будущего ($\mathscr{I}^+$). Та область пространства-времени в очень далеком будущем, куда идут мировые линии всех лучей света.

Световая бесконечность прошлого ($\mathscr{I}^-$). Та область пространства-времени в удаленном прошлом, откуда приходят мировые линии лучей света.

Световой год. Расстояние, которое свет проходит в вакууме за один год (приблизительно десять триллионов (10^{13}) км).

Световой конус. Геометрическое место событий (точек пространства-времени), в которые может прийти свет, излученный в данном событии (вершине светового конуса), или из которых он может достичь этой вершины.

Светоподобная мировая линия. «Траектория» в пространстве-времени, имеющая наклон к оси времени, равный 45°,– мировая линия светового луча. Называется также **изотропной мировой линией.**

Серая дыра. Область сильного гравитационного поля, состоящая из сингулярности и горизонта событий, откуда вещество может на время выходить, чтобы снова упасть обратно.

Сингулярность. Место, где кривизна пространства-времени обращается в бесконечность (например, в центре черной дыры).

Синтез (термоядерный). Термоядерная реакция, приводящая к слиянию легких атомных ядер и образованию ядер более тяжелых элементов.

Система координат. Воображаемая сетка, которой пользуются для описания положения тел в пространстве и времени.

Собственная длина. Расстояние между двумя точками, изме-

ренное наблюдателем, который покоится относительно этих точек.

Собственная масса. Масса тела, измеренная наблюдателем, который покоится относительно этого тела.

Собственное время. Время, измеренное по часам наблюдателя, свободно падающего в гравитационном поле (чаще: время, измеренное наблюдателем по часам, которые относительно него покоятся).

Событие. Точка в пространстве-времени: момент и место совершения мгновенного и точечного процессов.

Соотношение масса–светимость. Взаимосвязь между массой и светимостью звезд главной последовательности.

Солнечная система. Система, включающая Солнце и обращающиеся вокруг него планеты с их спутниками, малые планеты, кометы, метеорные тела и прочие объекты, движущиеся вокруг Солнца.

Солнечный ветер. Поток электронов и протонов с большими скоростями, постоянно испускаемых Солнцем.

Соотношение неопределенностей. Утверждение, что невозможно одновременно знать со сколь угодно большой точностью и положение, и скорость субатомных частиц.

Спектр. Разложение белого света на «цвета радуги» при прохождении через призму (или иное устройство).

Спектр электромагнитных волн. Совокупность всех видов электромагнитного излучения, начиная с очень коротковолновых гамма-лучей и кончая самыми длинными радиоволнами.

Спектрально-двойная (звезда). Система двух звезд, заключение о двойственном характере которой получено по периодическому смещению линий в спектре.

Спектральная линия. Тонкая яркая или темная линия на фоне сплошного спектра.

Специальная теория относительности (частная теория относительности). Ковариантная формулировка механики и электродинамики в плоском пространстве-времени.

Спиральная галактика. Уплощенная вращающаяся галактика с закрученными рукавами, исходящими из галактического ядра.

Спиральная галактика пересечения. Спиральная галактика, спиральные рукава которой начинаются на концах «перекладины», проходящей через ядро галактики.

Сплющенные эллипсоидальные координаты. Система координат, удобная для описания геометрических свойств керровской черной дыры.

Тардион. Объект, всегда движущийся со скоростью, меньшей, чем скорость света (иногда называется **брадионом**).

Тахион. Гипотетический объект, который всегда движется со скоростью, большей, чем скорость света.

Тензор кривизны Римана. Тензор, содержащий подробную математическую информацию о геометрии пространства любого данного числа измерений.

Тензор Риччи. Тензор, построенный из компонентов тензора кривизны Римана и входящий в состав уравнений гравитационного поля в общей теории относительности.

Тензор Эйнштейна. Тензор, построенный из компонентов тензора Риччи и стоящий в левой части уравнений гравитационного поля в общей теории относительности (уравнения Эйнштейна).

Тензор электромагнитной напряженности. Математическая величина, полностью описывающая электромагнитное поле в четырехмерном пространстве-времени.

Тензор энергии-импульса. Тензор, содержащий подробную математическую информацию о распределении в пространстве и изменении во времени энергии, импульса, давлений и пр. Стоит в правой части уравнений гравитационного поля в общей теории относительности (в качестве источника гравитационного поля).

Тензорный анализ. Область математики, рассматривающая свойства тензоров и операции над ними.

Термоядерная реакция. Реакция превращения легких элементов в тяжелые, происходящая при столкновениях ядерных частиц на высоких энергиях.

Термоядерная энергия. Энергия, выделяющаяся при термоядерных реакциях.

Туманность. Облако межзвездного газа или пыли, испускающее свет (или наоборот, поглощающее свет расположенных за ним звезд).

Туннельный эффект. Квантовомеханический процесс, при котором частицы могут проходить через потенциальный барьер.

Тяготение. (Гравитация.) Явление притяжения друг друга материальными телами.

Увлечение инерциальных систем. Явление, состоящее в том, что пространство-время вокруг вращающегося тела вовлекается в его вращение (эффект Лензе–Тирринга).

Уравнения геодезической. Система уравнений, решения которых описывают кратчайшие пути (т.е. геодезические) между событиями в искривленном пространстве-времени.

Уравнения гравитационного поля. В общей теории относительности они называются также **уравнениями Эйнштейна**. Система уравнений, определяющая гравитационное поле (или кривизну пространства-времени) по распределению и движению материи.

Уравнения электромагнитного поля. Система четырех уравнений, описывающих источники и поведение электрического и магнитного полей.

Ускорение. Темп изменения скорости.

Фиолетовое смещение. Уменьшение длины волны электромаг-

нитного излучения вследствие приближения источника к наблюдателю.

Фиолетовый слой. Область вблизи горизонта событий, где скапливается свет с сильным фиолетовым смещением.

Фотон. Квант – элементарная частица электромагнитного излучения (света).

Фотонная орбита. Круговая орбита луча света вокруг шварцшильдовской черной дыры.

Фотонная сфера. Сфера, образованная круговыми орбитами света вокруг шварцшильдовской черной дыры.

Частная теория относительности. (Специальная теория относительности.). Ковариантная формулировка механики и электродинамики в плоском пространстве-времени.

Черная дыра. Сильно искривленная область пространства-времени, включающая сингулярность, окруженную горизонтом событий.

Черная дыра Райснера–Нордстрёма. Черная дыра, обладающая массой и электрическим зарядом; невращающаяся заряженная черная дыра.

Чернодырная бомба. Фантастическое взрывающееся устройство, работающее на принципе сверхизлучательного рассеяния света, запертого около керровской черной дыры.

Шварцшильдовская черная дыра. Черная дыра, обладающая только массой; невращающаяся электрически нейтральная черная дыра.

Шварцшильдовский радиус. Радиус горизонта событий, окружающего шварцшильдовскую черную дыру.

Эволюция звезд. Изменения, которые претерпевают размеры, светимость, структура и другие свойства звезд с течением времени.

Электромагнитное излучение. Излучение, состоящее из переменных электрического и магнитного полей и распространяющееся со скоростью света. Сюда входят радиоволны, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.

Электромагнитное поле. Область пространства, содержащая электрическое и магнитное поля.

Электрон. Отрицательно заряженная субатомная частица, обычно движущаяся в атоме вокруг ядра.

Эллипс. Коническое сечение; получается как замкнутая линия пересечения конуса плоскостью.

Эллиптическая галактика. Галактика, имеющая эллиптическую форму и совсем не обладающая спиральной структурой.

Эпицикл. Малый круг в орбите тела согласно геоцентрической системе Птолемея.

Эргосфера. Область, окружающая керровскую черную дыру и расположенная между пределом статичности и внешним горизонтом событий, где находиться в состоянии покоя невозможно.

«Эфир». Гипотетическая субстанция, постулировавшаяся физиками в XIX в., в которой должны были бы распространяться электромагнитные волны.

Эффект Лензе – Тирринга. Явление, состоящее в «увлечении» пространства-времени вращающимся телом: увлечение инерциальных систем.

Эффект Мёссбауэра. Явление, известное в ядерной физике, благодаря которому ядра радиоактивных изотопов могут использоваться как чрезвычайно точные часы.

Эффект сокращения масштабов Лоренца–Фитцджералда. Явление, состоящее в том, что, с точки зрения неподвижного наблюдателя, измеряемые им расстояния параллельно направлению движения подвижного наблюдателя в системе этого последнего оказываются укороченными.

Ядро (атомное). Самая тяжелая часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, вокруг которой обращаются электроны.

Ядро (галактики). Концентрация звезд и, возможно, газа вблизи центра галактики.

ОГЛАВЛЕНИЕ

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу:

129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., дом 2.
Изд-во «Мир».